



Simulador de ILS en MATLAB

Universidad Carlos III De Madrid

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo de Fin de Grado

Autor: Guillermo Ramón Sánchez

Tutor: Dr. Víctor P. Gil Jiménez

Enero, 2018

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

“Que nada te desvíe del camino”

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mi tutor, Victor P.Gil Jiménez, por confiar en mi para la realización del presente trabajo así como por guiarme durante todo el proceso de desarrollo. Gracias a él tengo más claro mi futuro profesional y eso algo que me marcará el resto de mi vida.

En segundo lugar, a mi familia. El camino realizado hasta este punto habría sido imposible sin su apoyo. Siempre han creído en mi, muchas veces más de lo que yo mismo he hecho y por ello, sin su apoyo incondicional nada de esto habría sido posible. Seguiré llenando la maleta.

Por último, mi abuelo, recordarle todos los días me da la fuerza necesaria para seguir en los momentos más duros.

(En blanco)

Resumen

Este proyecto ha consistido en la realización de una simulación de un sistema ILS, *instrument landing system*, en la plataforma de desarrollo Matlab. Dicho sistema provee al piloto de una ayuda en cabina para el aterrizaje que, utilizado en conjunto con el resto de aparatos de vuelo, permite que la aeronave sea maniobrada a lo largo de una precisa trayectoria final de aproximación a la pista y posterior aterrizaje.

Se tendrán en cuenta parámetros como la posición inicial de la aeronave, la velocidad de la misma y las condiciones de viento existentes, para una simulación lo mas cercana posible a la realidad.

Se ha escogido la herramienta de Matlab para la simulación ya que nos permite realizar cálculos matemáticos con una alta precisión y rápida ejecución, y brinda un amplio soporte de funciones previamente definidas, que son de alta utilidad a la hora de trabajar con arrays de antenas y modulación de señales.

(En blanco)

Contenido

1. Introducción / Introduction	17
1.1 English version.....	17
1.1.1 Motivation.....	18
1.1.2 Goals.....	19
1.2 Versión en español.....	19
1.2.1 Motivación.....	21
1.2.2 Objetivo.....	22
2. Introducción a los sistemas de radionavegación.....	23
2.1 Introducción a los sistemas de radionavegación.....	23
2.2 Historia de las comunicaciones y de la navegación aérea.....	26
3. Estado del Arte.....	30
3.1 Radionavegación en la actualidad.....	30
3.1.1 MLS.....	30
3.1.2 GNSS.....	33
3.2 Alternativas a la herramienta desarrollada.....	37
3.3 Regulación.....	37
3.3.1 ICAO.....	38
3.3.2 CNAF.....	38
3.4 Marco socioeconómico.....	39
4. Descripción del entorno de trabajo.....	42
4.1 Descripción del escenario.....	42
4.1.1 <i>Localizer</i>	43
4.1.2 <i>Glide Slope</i>	45
4.1.3 Radiobalizas.....	46
4.1.4 Equipos receptores.....	47
4.2 Inconvenientes y limitaciones del ILS.....	48
5. Desarrollo de la simulación.....	49
5.1 Simulación del <i>localizer</i>	49
5.2 Simulación del <i>Glide Slope</i>	52
5.3 Simulación del indicador de trayectoria.....	54
5.4 Simulación de los <i>marker beacons</i>	55

5.5	Simulación de la velocidad del avión y del viento.....	56
5.6	Simulación completa.....	57
6.	Alternativas y futuras líneas de desarrollo.....	61
6.1	Elementos no simulados.....	61
6.1.1	VOR.....	61
6.1.2	Aproximación completa.....	61
6.1.3	Cambios meteorológicos.....	62
6.1.4	Incluir cambios en función de la categoría del aterrizaje.....	62
6.1.5	DME.....	62
6.2	Mejoras.....	62
6.2.1	Precisión en la velocidad del avión.....	62
6.2.2	Precisión en la velocidad del viento.....	63
7.	Pruebas y evaluación del resultado.....	64
7.1	Pruebas.....	64
7.1.1	Posicionamiento arriba y a la derecha.....	64
7.1.1.1	Posicionamiento arriba y a la derecha con diferentes velocidades	65
7.1.2	Posicionamiento arriba y a la izquierda.....	66
7.1.2.1	Posicionamiento arriba y a la izquierda con diferentes velocidades	67
7.1.3	Posicionamiento abajo y a la derecha.....	67
7.1.3.1	Posicionamiento abajo y a la derecha con diferentes velocidades	68
7.1.4	Posicionamiento abajo y a la izquierda.....	69
7.1.4.1	Posicionamiento abajo y a la izquierda con diferentes velocidades	69
7.1.5	Prueba simulando el viento.....	70
7.2	Evaluación de los resultados.....	73
8.	Planificación y presupuesto	74
8.1	Planificación.....	74
8.2	Presupuesto.....	77
8.1.1	Costes de personal.....	77
8.1.2	Costes materiales.....	78

8.1.3	Coste total	78
9.	Conclusiones finales.....	80
9.1	Conclusiones finales.....	80
	Bibliografía.....	82
	Anexo I - Manual de usuario.....	86
	Anexo II - Extended abstract	90

Ilustraciones

Figura 1	Radar de vigilancia.....	26
Figura 2	Tecnologías usadas en función de la distancia [4].....	27
Figura 3	Manuscrito de Mahlon Loomis.....	28
Figura 4	Aproximación de Lorenz.....	30
Figura 5	Cobertura horizontal de los sistemas MLS.....	33
Figura 6	Pulsos recibidos por la aeronave en una sistema MLS.....	34
Figura 7	Angulo del haz en función del tiempo en un sistema MLS.....	34
Figura 8	Cobertura vertical de los sistemas MLS.....	35
Figura 9	Un único satélite describe una circunferencia en la superficie de la Tierra.	36
Figura 10	Dos satélites describen 2 puntos unívocos sobre la superficie de la Tierra.	36
Figura 11	Constelación de satélites alrededor de la tierra.....	37
Figura 12	Cuadro de frecuencias para radionavegación ILS.....	41
Figura 13	Gráfico Total de accidentes - Año.....	42
Figura 14	Sistema ILS.....	44
Figura 15	Cobertura horizontal de un sistema ILS.....	46
Figura 16	Cobertura vertical de un sistema ILS.....	48
Figura 17	Diagrama de bloques de un receptor ILS.....	50
Figura 18	Patrón de radiación de la antena a 150 Hz del localizador.....	52
Figura 19	Patrón de radiación de las antena del localizador.....	52
Figura 20	Esquema para el posicionamiento horizontal de avión.....	53
Figura 21	Patrón de radiación de la antena a 90 Hz del <i>glide slope</i>	54
Figura 22	Patrón de radiación de las antenas del glide slope.....	55
Figura 23	Esquema para el posicionamiento vertical de avión.....	56
Figura 24	Indicadores de posición en cabina.....	56
Figura 25	Indicadores de posición en cabina.....	57
Figura 26	<i>Marker beacons</i> simulados.....	58
Figura 27	Pantalla de inicio de la simulación.....	60
Figura 28	Pantalla de desarrollo de la simulación.....	61
Figura 29	Pantalla resumen de la simulación.....	62
Figura 30	Prueba número 1, avión arriba a la derecha y velocidad normal.....	67
Figura 31	Prueba 1, velocidad alta.....	68
Figura 32	Prueba 1, velocidad lenta.....	68
Figura 33	Prueba número 2, avión arriba a la izquierda y velocidad normal.....	68
Figura 34	Prueba 2, velocidad alta.....	69
Figura 35	Prueba 2, velocidad lenta.....	69
Figura 36	Prueba número 3, avión abajo a la derecha y velocidad normal.....	70
Figura 37	Prueba 3, velocidad alta.....	70
Figura 38	Prueba 3, velocidad lenta.....	70
Figura 39	Prueba número 3, avión abajo a la izquierda y velocidad normal.....	71

Figura 40	Prueba 3, velocidad alta.....	71
Figura 41	Prueba 3, velocidad lenta.....	71
Figura 42	Configuración parámetros y velocidad de viento.....	72
Figura 43	Avión arriba a la derecha con racha de viento hacia la derecha.....	73
Figura 44	Avión arriba a la derecha con racha de viento hacia la izquierda.....	74
Figura 45	Simulación viento ascendente.....	74
Figura 46	Simulación viento descendente.....	74
Figura 47	Diagrama de Gant.....	79
Figura 48	Pantalla de selección del viento.....	88
Figura 49	Pantalla de inicio sin simulación de viento.....	89
Figura 50	Pantalla de inicio con simulación de viento.....	89
Figura 51	Pantalla de simulación.....	90
Figura 52	Estado final de simulación correcta.....	90
Figura 53	Pantalla final de simulación.....	91
Figura 54	IATA forecast passenger demand.....	92
Figure 55	Boeing annual accidents study.....	93
Figure 56	Horizontal coverage of the ILS.....	94
Figure 57	Vertical coverage of the ILS.....	95
Figure 58	Block diagram for the receiving antennas.....	95
Figure 59	Initial display.....	96
Figure 60	Initial configuration display.....	96
Figure 61	Simulation screen.....	97
Figure 62	Final simulation screen.....	97

Tablas

Tabla 1	Procedimientos de medida de parámetros de navegación.....	27
Tabla 2	Categorías de visibilidad ICAO.....	45
Tabla 3	Emparejamiento de frecuencias del localizer y glide slope.....	47
Tabla 4	Detalles de la planificación y desarrollo del proyecto	78
Tabla 5	Costes de personal.....	79
Tabla 6	Coste de material	80
Tabla 7	Costes directos	81
Tabla 8	Costes totales.....	81

Acrónimos y siglas

Acrónimos y Siglas	Definition	Definición
AM	Amplitude modulation	Amplitud modulada
ATC	Air traffic control.	Control de tráfico aéreo
CNAF	Cuadro nacional de atribución de frecuencias.	
DDM	Difference in depth modulation.	Diferencia en profundidad de modulación
DGPS	Differential GPS.	GPS diferencial
DME	Distance measuring equipment	Equipo telemétrico
FAA	Federal aviation administration.	Administración Federal de aviación
GBAS	Ground based augmentation system.	Sistema de aumentación basado en tierra

Acrónimos y Siglas	Definition	Definición
GNSS	Global navigation satellite system.	Sistema global de navegación por satélite
GPS	Global positioning system.	Sistema de posicionamiento global
IATA	International air transport navigation.	Asociación internacional de transporte aéreo
ICAO	International civil aviation organization.	Organización de aviación civil internacional
ILS	Instrument landing system.	Sistema de aterrizaje instrumental
ITU	International telecommunication union.	Unión internacional de telecomunicaciones
IVA		Impuesto sobre el valor añadido
LAAS	Local area augmentation system.	Sistema de aumento de área local

Acrónimos y Siglas	Definition	Definición
LORAN	Long range navigation.	
LPV	Localizer performance with vertical guidance.	
MLS	Microwave landing system.	
NEC	North east corridor.	Corredor del noroeste
ONU	United nations	Organización de Naciones Unidas.
PAR	Precision approach radar.	Radar de aproximación de precisión
RADAR	Radio detection and ranging.	Detección y medición de distancias por radio
SARPs	Standards and recommended practices.	
TDM	Time dimension multiplexing.	Multiplexación por división en el tiempo

Acrónimos y Siglas	Definition	Definición
TFG		Trabajo fin de Grado.
TRSB	Time referenced scanning beam.	
UC3M		Universidad Carlos III de Madrid.
UHF	Ultra high frequency	Frecuencia ultra alta
VHF	Very high frequency.	Frecuencia muy alta
VOR	Very high frequency omnidirectional range.	Radio faro omnidireccional de muy alta frecuencia
WAAS	Wide area augmentation system.	

Capítulo 1.

Introducción / Introduction

1.1 English version

This thesis describes the process of simulation an instrument landing system on a development platform called Matlab.¹

One of the hardest tasks for any pilot is to achieve a safe landing. The first aviators landed on big open field terrains, in any direction that provided the best angle on the wind. But as air traffic increased and airplanes started to use airports instead of farms and fields, landings where limited to certain directions and it was start to develop the first landing aids to help the pilot to set up a proper approach path and to perform a safer landing [1].

The word approach describes the phase of the flight that immediately precedes the landing. Whereas approaching ends with landing, deciding where it starts can be harder because there should be certain previous maneuvers for the plane to be aligned to his final landing approach route. Many of them are made attending to the information that the pilot obtains from the ILS.

An instrument landing system is formed by 3 main elements, the localizer, which provides lateral steering, the glide slope, whose function is to provide information with the position relative to the correct vertical approach, and finally the marker beacons, which indicates the pilot, using hearing signals inside the cockpit, the relative distance from the plane to the landing point. There are 3 of them, the outer marker, the middle marker and the inner one.

All of the elements previously mentioned have been simulated according to the technical specifications required by the ICAO¹ [2]. That includes, modulations, frequencies, distances and approach angles.

¹ URL: <http://icao.int/>. Último acceso: Octubre 2017

On implementing the system, external elements have also been taken into consideration as; airplane and wind speed, which are parameters that will help us to develop a more accurate simulation.

This altogether will allow us to determine any position in the space where we want to place the airplane and initiate the simulation. The system is able to fix either the vertical or the horizontal position as the plane flies. Besides, it can check and correct the speed of descending, being able to accelerate or decelerate in case the speed chosen was not the correct one for that landing. The only element that could alter the correct positioning of the plane is the wind which, as in a real situation, can enormously affect the procedure of landing

1.1.1 Motivation

The motivation for choosing this topic can be seen through 2 different points of view, one of them attending to personal reasons, that are going to be detailed later on, and the use that systems, as the one developed, may have in the society of today.

To compose a global idea of how crucial air control systems are, it is necessary to understand the importance of the air traffic worldwide, to do that we will attend to a study developed by the IATA (international air transport navigation) analyzing the air traffic for 2016. *“The demand (revenue passenger kilometers or RPKs) rose 6.3% compared to 2015 (or 6.0% if adjusted for the leap year). This strong performance was well ahead of the ten-year average annual growth rate of 5.5%. Capacity rose 6.2% (unadjusted) compared to 2015, pushing the load factor up 0.1 percentage points to a record full-year average high of 80.5%.”*. Data for 2017 is not available for the time this thesis is been written but a growth for all the numbers given it is foreseen. [2]

Analyzing the parameters given by the study of the IATA, we can come to an immediate conclusion. Air traffic plays a major role in today's economy and suffers a continuous growth, giving access to air transportation to more and more people every day. It is crucial then, an efficient use of this transport that allows this number to keep growing. Implementing technologies to develop a safer, quicker and profitable mean of transport will be necessary if we want to build a more integrated society where the access to air transportation is more accessible to every one.

Once the role played nowadays by systems as the one developed in this research has been analyzed, we can detail the personal factors that have made me chose this topic. As a telecommunication engineer student, windows opened when you have to chose a case of study, are a lot, and there are also many fields of study you can focus on. All of those doubts were gone after taking the subject called Telecommunications Systems since it made me get interested in wireless communications, satellites, antennas, airplanes etc. So what I expected by developing this system was delved into that kind of systems, being able to simulate a whole system, learning what kind of parts integrate it.

1.1.2 Goals

The main purpose of this project is to develop a whole ILS system. Not only simulate the different parts that constitute it, but also other parameters like wind and airplane speed. This altogether will allow us to recreate a real landing situation. Commercially speaking it may have numerous applications as being able to set up certain flight configurations and study how these affect the landing process without performing an approximation with a real airplane. This could translate into a huge save of resources. Another possibility when using this software, and that will be more accurately described in further chapter of this thesis, is the implementation of the program into a hardware and then installed into a drone so it can facilitate the correct configuration of the transmitting antennas. Again, to avoid using an airplane.

From the educational point of view, this thesis has been developed as clear and easy to use as possible so it can be a good starting point, not only to understand how instrument landing systems work, but also to acquire knowledge in signal modulation and antennas since this technologies conform the base to implement any communication system.

Now, focusing on how the simulation has to perform, since the beginning of the development we have set the objective of always landing correctly. Independently of speed and placement of the plane. The only factor that can alter the correct landing would be the wind.

1.2 Versión en español

La presente memoria describe el proceso de simulación de un sistema ILS en la plataforma de desarrollo de Matlab.

Una de las tareas más difíciles para cualquier piloto es la de conseguir un

aterrizaje seguro. Los primeros aviadores aterrizaban sobre grandes campos despejados, en cualquier dirección que le diera el mejor ángulo respecto al viento. Pero a medida que el tráfico aéreo aumentó y los aviones comenzaron a usar aeropuertos en vez de granjas y campos, los aterrizajes se limitaron para ciertas direcciones y empezaron a desarrollarse las asistencias al aterrizaje para ayudar al piloto a definir una correcta trayectoria de descenso y realizar un aterrizaje más seguro[1].

La palabra aproximación describe la fase del vuelo que precede inmediatamente al aterrizaje. Mientras que la aproximación termina con el aterrizaje, decidir cuando comienza la fase de aproximación resulta más complicado ya que deben realizarse ciertas maniobras previamente a que el avión sea alineado con su trayectoria final de descenso, muchas de las cuales son realizadas atendiendo a la información que el piloto obtiene del ILS.

Un sistema de aterrizaje instrumental está formado principalmente por 3 elementos; la antena localizadora, *localizer*, la cual provee direccionamiento horizontal; la antena transmisora de la senda de planeo, *glide slope*, cuya función es transmitir al avión su situación respecto a la trayectoria correcta de descenso vertical; y finalmente las radiobalizas, que indican al piloto, mediante una serie de pitidos audibles en el interior de la cabina, a diferentes frecuencias, la distancia relativa del avión al punto de aterrizaje, distinguiéndose 3 tipos diferentes de balizas; exterior, intermedia e interior.

Todos los elementos anteriormente citados se han simulado teniendo en cuenta las especificaciones técnicas requeridas por la ICAO² [2], esto incluye: tipos de modulación, frecuencias de modulación, distancias ángulos de descenso.

A la hora de implementar el sistema, también se han tenido en cuenta elementos externos a este, como la velocidad del avión y la velocidad del viento, los cuales son parámetros que nos ayudarán a desarrollar un entorno de trabajo lo más preciso y acorde posible a la realidad.

Todo ello en conjunto permitirá elegir cualquier posición del espacio donde se desea colocar la aeronave para iniciar la simulación, siendo capaz el sistema de corregir el posicionamiento tanto vertical como horizontal del avión a medida que avanza, así como, controlar la velocidad correcta de descenso, pudiendo aumentar o disminuir la misma en caso de que el avión vuele a una velocidad no recomendada para dicho aterrizaje, lo que permitirá a la aeronave aterrizar correctamente independientemente de la velocidad y posición inicial que se parta. El único elemento que podrá alterar el correcto posicionamiento del avión en el descenso

² URL: <http://icao.int/>. Último acceso: Octubre 2017

será el viento, que, como en una situación real puede afectar enormemente el correcto desarrollo del aterrizaje.

1.2.1 Motivación

La motivación para la elección del tema del trabajo puede ser vista desde dos perspectivas diferentes: una de ellas, atendiendo a motivos personales, los cuales serán detallados mas adelante; la otra es la utilidad que pueden tener sistemas como el que se ha desarrollado, en la sociedad de hoy en día.

Para poder componer una idea global de lo importante que son los sistemas de control aéreo es necesario entender la relevancia del tráfico aéreo a nivel mundial; para ello atenderemos a un estudio realizado por la IATA³ (*International air transport navigation*) analizando el total del tráfico aéreo para el año 2016: *“La demanda de transporte aéreo aumentó un 6,3% en 2016 en comparación con 2015 (6% tras el ajuste del año bisiesto), un sólido crecimiento que superó el 5,5% de promedio anual de los 10 últimos años. La capacidad ofertada por la industria aérea subió un 6,2% (sin ajuste) en comparación con 2015, lo que mejoró la ocupación en 0,1 puntos porcentuales, alcanzando, no obstante, la cifra récord de un 80,5%. En total, la industria aérea transportó 3.700 millones de pasajeros, otro dato récord al que ha contribuido la apertura de más de 700 nuevas rutas”*. Los datos para el 2017 no están disponibles en el momento en que esta memoria esta siendo realizada pero se prevé un crecimiento en todos los datos aportados [3].

Analizando los parámetros que nos arroja el estudio realizado por IATA, se puede llegar a una conclusión inmediata y es que, el tráfico aéreo juega un papel crucial en la economía actual, y sufre un crecimiento continuo, dando acceso al transporte aéreo cada vez a mas personas. Es, por tanto, de vital importancia, un uso eficiente de este transporte, para que dichas cifras sigan aumentando. Será necesario, si queremos construir una sociedad cada vez más inclusiva en la que el acceso a este medio de transporte sea más accesible al conjunto de la población mundial, que se implementen tecnologías que hagan que el transporte aéreo sea cada vez mas seguro, rápido y eficaz.

Una vez analizado brevemente el papel que juega sistemas como el implementado, podemos detenernos en los factores personales que han hecho que haya elegido el tema previamente mencionado. Como estudiante de Ingeniería de Telecomunicaciones, las oportunidades que se abren a la hora de elegir un tema para el trabajo fin de Grado son muy amplías, ya que con dicha ingeniería son muchas las posibles ramas de investigación, todas estas dudas se fueron concretando a partir de

³ <http://www.iata.org/Pages/default.aspx>. Último acceso febrero 2018

cursar la asignatura, de cuarto curso llamada Sistemas de Telecomunicación que hizo interesarme por el campo de las comunicaciones inalámbricas y todos los elementos que la forman, ya sean satélites, antenas, móviles etc. Por lo tanto, lo que pretendía desarrollando el sistema implementado, era poder ahondar en el estudio de dichos sistemas, siendo capaz de simular un sistema completo, aprendiendo como funcionan las diferentes partes que lo integran.

1.2.1 Objetivo

La finalidad principal de este trabajo es desarrollar un sistema completo ILS, simulando, no solo todos los elementos que lo componen sino también otros parámetros como la velocidad de la aeronave y del viento. Pudiendo así recrear una situación real de aterrizaje. A nivel personal el desarrollo de dicho sistema me permitirá comprender el funcionamiento de ILS. A nivel profesional puede tener numerosas utilidades como por ejemplo poder simular ciertas configuraciones de vuelo, para estudiar cómo afectan estas al proceso de aterrizaje, sin tener que llevar a cabo una aproximación real con un avión (lo que podría suponer un enorme ahorro de recursos). Otra de las posibles utilidades del software que se ha desarrollado, y que será descrito mas adelante en esta memoria, es la implementación, en un equipo hardware, del sistema, para colocarlo en drones y así facilitar enormemente la configuración de las antenas emisoras para el correcto funcionamiento del sistema.

Desde el punto de vista educativo, este trabajo fin de grado se ha desarrollado de la forma más sencilla y clara posible, por lo que puede ser un buen punto de partida, para entender como funciona un sistema de aterrizaje instrumental además de, para adquirir conocimientos en modulación de señales y antenas, ya que estos forman la base para la implementación de cualquier sistema de comunicaciones.

Si nos centramos en la manera en la que se tiene que comportar el avión, desde el principio se ha querido que el avión aterrice correctamente sin importar su colocación inicial ni su velocidad. El único factor alteraría la correcta colocación del avión sería la velocidad del viento.

Capítulo 2.

Introducción a los sistemas de radionavegación

En el presente capítulo se establecerá una visión global de los sistemas de aproximación guiada y radionavegación, lo que nos permitirá conocer la historia de dichos sistemas.

Tomaremos como punto de partida para desarrollar esta sección la definición que hace la ITU de los sistemas ILS:

“Sistema de radionavegación el cual provee direccionamiento tanto vertical como horizontal justo antes y durante el aterrizaje y, en ciertos puntos, indica la distancia al punto de aterrizaje de referencia.”

— Artículo 1.104, ITU Radio Regulations (ITU RR),[3]

Por lo tanto será conveniente empezar por precisar lo que es un sistema de radionavegación y cómo se han desarrollado a lo largo de su historia. Para posteriormente presentar los diferentes sistemas de radionavegación que existen, incluido el ILS.

2.1 Introducción a los sistemas de radionavegación

La navegación es la determinación de la posición y velocidad de un objeto en movimiento. Los tres componentes del posicionamiento y los tres componentes de la velocidad crean un vector de estado, con 6 componentes, que describe completamente el movimiento de traslación de un vehículo. Los datos de la navegación normalmente son enviados a otros sistemas *on-board*, como el sistema de control de vuelo, el decontrol de motor, el de control de comunicaciones, instrumentos en cabina, y en caso de una aeronave militar, a los controladores de los sistemas de armamento.

Los sensores de navegación pueden estar colocados en el propio vehículo, en otra aeronave, en tierra o incluso en el espacio. Cuando el vector de estados previamente mencionado es calculado dentro del aparato, el proceso se denomina proceso de navegación; mientras que, si dicho proceso se determina desde fuera del mismo, se llama vigilancia, *surveillance*, o determinación de posición, *position location*.

La información obtenida en *surveillance* es empleada para prever posibles colisiones entre aeronaves, este es uno de los principales objetivos en el uso de los sistemas de navegación. El personal y el material encargados de dirigir y controlar el tráfico civil aéreo y casi la mayoría del tráfico militar, están localizados en los centros de control de tráfico de rutas aéreas situados en tierra, *Air Route Traffic Control Centers*. También existe otro tipo de controladores para determinado tráfico aéreo militar situados en aviones de vigilancia y en portaaviones[5].

Los sistemas de control aéreo existentes determinan la posición de la aeronave utilizando sensores fuera del propio aparato, como por ejemplo radares de vigilancia, o reportes de situación generados por el propio avión., llamados, *Automatic dependent surveillance*.



Figura 1: Radar de vigilancia

Por lo tanto, podemos decir que, la radionavegación es la aplicación de las frecuencias de radio para determinar la posición de un objeto en la tierra[5]. Existen diferentes tipos de tecnologías, las cuales podrán utilizarse dependiendo de la distancia a la que se encuentra el objeto que se quiere controlar. En la figura 2 se puede observar de forma muy visual los diferentes rangos de distancias para cada una de ellas.

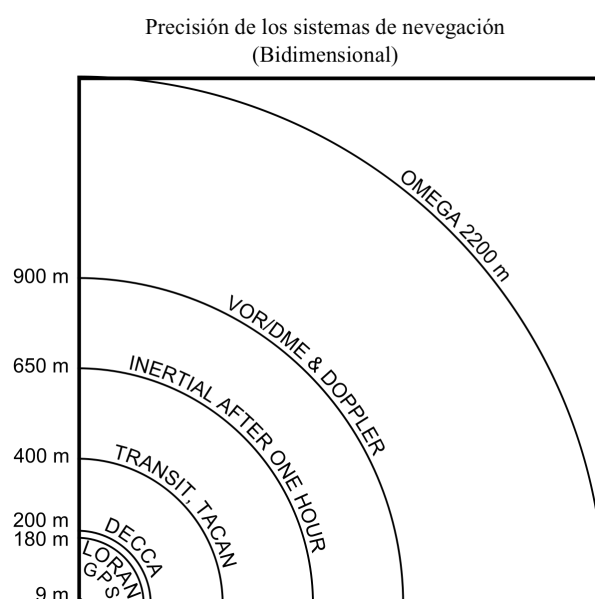


Figura 2 : Tecnologías usadas en función de la distancia [5].

Para determinar los parámetros de velocidad, dirección y distancia se utilizan diferentes tecnologías que se describen en la siguiente tabla [5]:

Medidas	Procedimientos
Dirección	Interferometría
Distancia	Telemetría
Velocidad	Utilizando el efecto Doppler

Tabla 1: Procedimientos de medida de parámetros de navegación

Para obtener una idea más precisa de la tabla 1 se definirán brevemente los términos que aparecen en los procedimientos:

1. Interferometría: Es un método de medición por interferencia de ondas, generalmente de luz o radio [6].
2. Telemetría: Forma para determinar de distancias midiendo el tiempo de viajes de la señal [7].
3. Efecto Doppler: Describe el cambio de frecuencia de la onda emisora recibida en un objeto en movimiento. Un ejemplo se da cuando se acerca un coche con una sirena; la frecuencia recibida es mayor cuando se está acercando el coche, igual que la emitida cuando pasa por el observador y menor cuando la sirena se aleja [8].

2.2 Historia de las comunicaciones y la navegación aérea

El primer paso en la historia fue dado en octubre de 1866 por el dentista Mahlon Loomis. Propuso un sistema de comunicaciones y transmisión de energía inalámbrico, consiguiendo hacer volar una cometa desde lo alto de una montaña en Virginia, USA, a 14 millas de distancia de su posición. Para conseguirlo, rodeo la cometa con una malla de cobre conectada directamente a un cable, también de cobre. Entre el cable y la tierra conectó un galvanómetro, dándose cuenta que se desviaba debido a la electricidad estática. Volando una cometa, igualmente a 14 millas de distancia, observó que si el cable de cobre estaba conectado a tierra, la desviación del galvanómetro cambiaba. Sin embargo, si el cable de las cometas era de una longitud diferente, este efecto no se producía. Gracias a este descubrimiento fue emitida en Estados Unidos el número de patente 129971 de “telegrafía inalámbrica”. Este método de comunicación no se continuó desarrollando y hoy en día solo nos han llegado algunos manuscritos como el de la figura 3: [9]

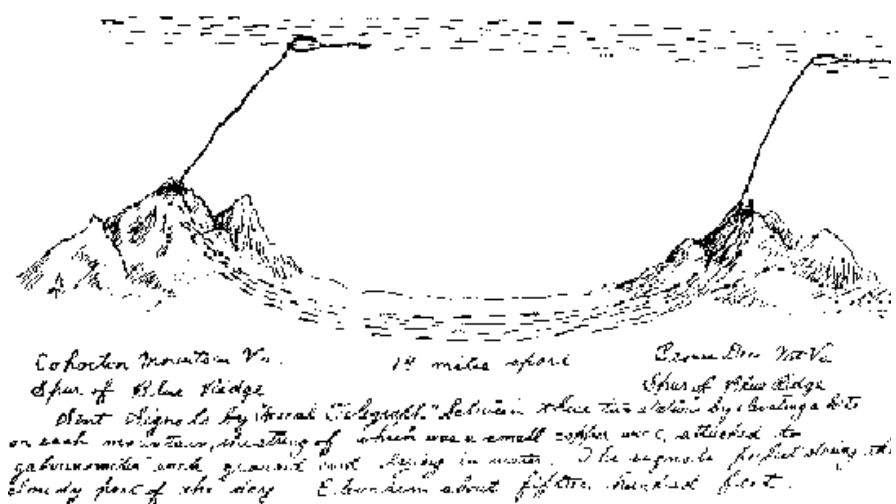


Figura 3: Manuscrito de Mahlon Loomis [47]

A finales del siglo XIX, varios investigadores de diferentes países estaban llegando a la conclusión del potencial de las ondas como medio de comunicación. Marconi posiblemente es el más conocido, pero fueron muchos los que contribuyeron al desarrollo de estas tecnologías. El almirante de la Royal Navy, Henry Bradwardine Jackson, hizo enormes avances en la implementación de las comunicaciones inalámbricas en entornos marítimos, siendo el primero en realizar una comunicación barco-barco y lograr una comunicación continua con una embarcación situada a 3 millas de distancia. [10]

William Henry Preece, desarrolló la mayoría de su carrera para el servicio postal británico, llegando a implementar un servicio de telegrafía y telefonía inalámbrica en 1892, muy parecido al que patentó Alexander Graham Bell en Estados Unidos en 1876. Otro de sus logros más relevantes fue conseguir transmitir y recibir señales de radio Morse a una distancia de aproximadamente 1 milla (1.6 km) a través del lago Coniston.

Por su parte; Aleksandr Stepánovich Popoff, consiguió enormes avances en Rusia; Reginald Fessenden, Nikola Tesla, Edison y Armstrong en Estados Unidos; Édouard Branly, en Francia; Heinrich Rudolf Hertz, Adolf Slaby, en Alemania; Valdemar Poulsen, en Dinamarca y Augusto Righi en Italia.

Con el cambio de siglo los ingenieros intentaban desarrollar tecnologías que permitieran mas allá que una simple conversación Morse. Poco a poco se fueron logrando comunicaciones a mayores distancia, culminando en la primera comunicación transatlántica, lograda por Marconi en 1901.

Otro hito importante en la historia de la navegación aérea y la comunicación fue conseguido por Reginald Fessenden el día de Navidad de 1906, cuando consiguió la primera transmisión *broadcast* de voz y música. Dichos avances sentaron las bases para el desarrollo posterior tanto de los sistemas de comunicación, como de los sistemas de navegación.

Se cree que la primera comunicación tierra-aire fue realizada por J.A.D. McCurdy en la pista de aterrizaje de Sheepshead Bay volando un biplano Curtiss, el 10 de agosto de 1910. Dicha comunicación fue la primera entre tierra y un aparato mas pesado que el aire, si bien, la comunicación con objetos menos pesados que el aire como globos ya se había producido algunos años antes.

Otro hecho importante tuvo lugar en 1911 con el dirigible *Beta*, construido por la armada Británica. En el cual se instalaron sistemas para el establecimiento de comunicaciones inalámbricas, consiguiendo una comunicación bidireccional a distancias de hasta 48 kilómetros. No obstante para lograr un intercambio de información satisfactoria, dicha comunicación debía producirse con los motores apagados ya que el sistema de ignición producía enormes interferencias a la señal. [11]

Centrándonos en los sistemas de navegación, a principios de 1900 ya había numerosos ingenieros investigando las características de antenas receptoras y cómo aplicarlas a la detección y direccionamiento de objetos [12]. Fue Marconi quien determinó que, para antenas que constaban de elementos tanto verticales como horizontales, en las que los brazos horizontales eran mucho mas largos que los verticales, se recibía una potencia mayor desde las estaciones en dirección opuesta a la que estaba apuntando el brazo horizontal. Ya en 1906, patentó un sistema en el que se

montaban un determinado número de estas antenas, en forma de L invertida, en un punto donde se recibía la señal, la antena que recibiera la señal con mayor intensidad indicaba la dirección desde donde venía. En otras palabras, este fue el primer aparato con el que se determinó la dirección de procedencia de una señal de radio: había inventado el radiogoniómetro. [13]

A partir del descubrimiento anteriormente comentado, se fueron dando pasos hacia lo que posteriormente se convertiría en la tecnología ILS y VOR (*very high frequency omnidirectional range*). Hubo dos descubrimientos que asentaron las bases del funcionamiento de dichas tecnologías; el primero de ellos fue diseñado por Oskar Scheller, de la compañía Lorenz, que propuso un “configurador de trayectorias” con el que podía ser definida una trayectoria altamente precisa, si las transmisiones eran realizadas desde dos antenas con diagramas de radiación que se cruzaran, definiendo el recorrido a realizar. Si las antenas eran excitadas alternativamente de forma que una radiara puntos y la otra rayas, o algún otro tipo de código Morse alterno como A y N o D y U, en un punto determinado de la trayectoria, el receptor recibe la misma potencia de cada antena y oirá un tono continuo; mientras que si el piloto se encuentra en uno de los lados predominará uno de los dos tonos. El alineamiento de la trayectoria deseada variará se cambian la potencia que alimenta las dos antenas. [13]

El segundo de ellos fue proyectado por Lorenz, consistía en un transmisor de VHF (*very high frequency*) situado al final de la pista de aterrizaje, operando aproximadamente a 33 MHz, utilizando también a la intersección de diagramas de radiación para guiar el avión en el descenso, como se puede ver en la figura 4. [14]

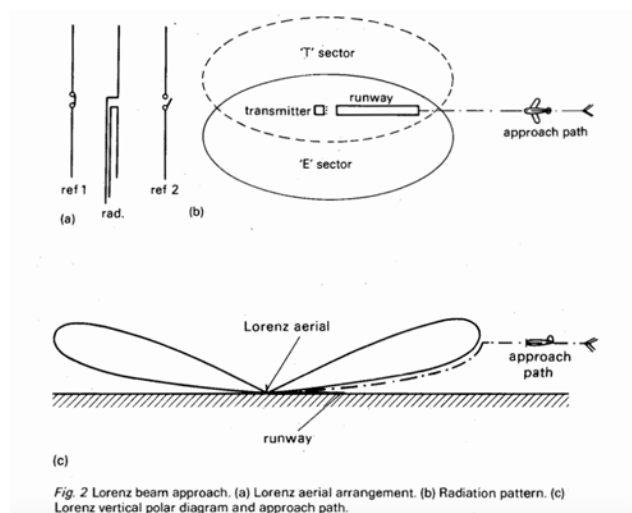


Figura 4: Aproximación de Lorenz

Estas tecnologías no solo sirvieron para la ayuda al aterrizaje de aviones, también fueron usados por la Luftwaffe en la Segunda Guerra Mundial para definir la trayectoria de las bombas que caían sobre Gran Bretaña.

Posteriormente, en 1938, la radionavegación se desarrolla a gran velocidad con la invención del RADAR (*radio detection and ranging*), lo que llevó a una mayor aplicación de tecnologías basadas en ondas de radio, surgiendo así los sistemas hiperbólicos de navegación tales como el LORAN (*long range navigation*) y el OMEGA. [14]

Ya en las décadas de los 40 y 50 surge el ILS tal y como lo conocemos hoy en día, siendo 1946 el año en que la OACI (organización de aviación civil internacional) escoge este sistema como la radio ayuda a utilizar en los aeropuertos internacionales, incluido en su anexo 10 del convenio sobre aviación civil, titulado Telecomunicaciones aeronáuticas. [15]

Capítulo 3.

Estado del Arte

Una vez se ha descrito lo que son los sistemas de radionavegación, así como su proceso de descubrimiento y desarrollo, pasaremos a explicar el estado actual de dichas tecnologías y sus organismos reguladores. Por último se detallarán herramientas similares a la que ha sido desarrollada.

3.1 Radionavegación en la actualidad

A lo largo de los últimos años, debido a la enorme utilidad de los sistemas de radioayuda y radionavegación, y pese a la gran popularidad de los sistemas ILS, han surgido diferentes alternativas, como el MLS (*microwave landing system*) y las aproximaciones por ayuda satelital, GNSS (*global navigation satellite system*).

A continuación se describen algunos de los detalles técnicos de los sistemas previamente citados y porqué se usan en determinadas situaciones en sustitución al ILS. La descripción, con mayor profundidad, del sistema ILS se realizará en el capítulo 3.

3.1.1 MLS

Esta tecnología surgió en 1970, cuando la FAA (*Federal aviation administration*) decidió que la tecnología ILS había alcanzado ya su máximo potencial tecnológico, y no podía satisfacer las necesidades requeridas de precisión para los aterrizajes. En concreto, experimentaron problemas en el corredor del noroeste⁴, NEC, debido a la congestión del espectro de frecuencias.

⁴ El corredor del noroeste es la línea ferroviaria electrificada más transitada de los Estados Unidos tanto por el número de personas que utilizan sus líneas, como por el número de trenes disponibles. La línea pasa por núcleos urbanos densamente poblados como Washington D.C, Filadelfia, Nueva York y Boston [16]

Los sistemas ILS están limitados a 40 canales y, con la densidad creciente del número de aeropuertos, dichos aparatos estaban empezando a interferir los unos con los otros. Otra de las inconvenientes fue la dificultad que tienen los sistemas ILS para cumplir los requerimientos de las operaciones con categoría II y categoría III, dichas categorías cuyo detalle se explicará más en detalle en el apartado 3.1.

Para aliviar dichos problemas, comenzó el desarrollo de un nuevo estándar internacional que operaría en las frecuencias de microondas⁵. Fueron propuestas 2 tipos de formatos de señal. La primera usando una técnica de Doppler (apoyado por Gran Bretaña), y el otro por conformación de haces de escaneo, TRSB (apoyado por Australia y Estados Unidos). Finalmente la ICAO (*international civil aviation organization*) se decidió por la implementación de la tecnología TRSB.

MLS trabaja por multiplexación en el dominio del tiempo, TDM (*time division multiplexing*), con ello consigue dividir el uso del tiempo en diferentes espacios, asignando cada función del sistema a los diferentes espacios. La trayectoria para el correcto descenso horizontal se define generando un diagrama de radiación con una gran directividad, que hace un “barrido” en el espacio, generando una cobertura como la que se presenta en la figura 5.

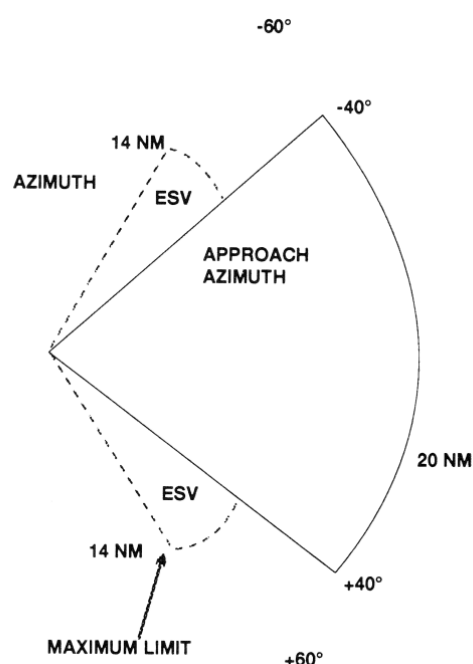


Figura 5: Cobertura horizontal de los sistemas MLS

⁵ 200 canales espaciados 300 kHz, desde 5,031 hasta 5,0907 GHz

Debido a que el diagrama de radiación se mueve primero en una dirección para después volver en la dirección opuesta, el receptor en la aeronave recibe dos pulsos de información en instantes diferentes de tiempo. El periodo de escaneo es sabido, ya que viene predefinido por la ICAO, por lo tanto, podremos definir el ángulo de acimut del avión respecto a la pista, midiendo el tiempo entre pulsos.

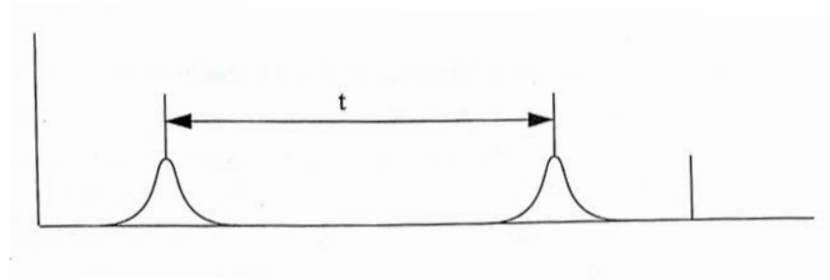


Figura 6: Pulsos recibidos por la aeronave en un sistema MLS

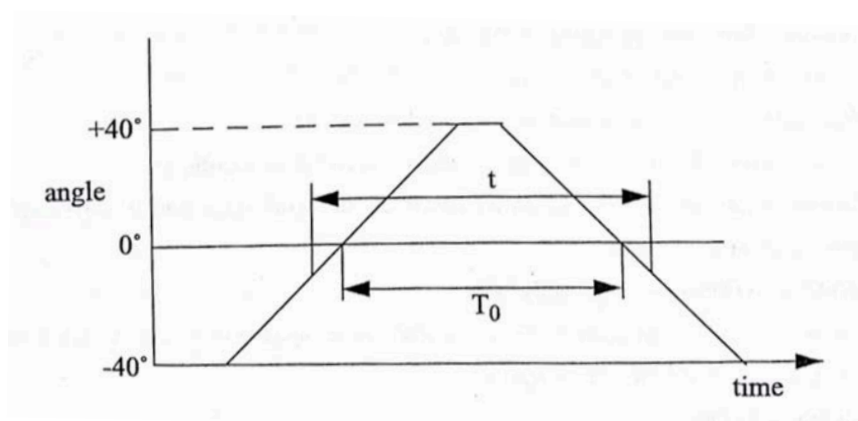


Figura 7: Ángulo del haz en función del tiempo en un sistema MLS

El ángulo del avión puede ser calculado de la siguiente forma:

$$\varphi = \frac{V}{2} \times (T_o - t)$$

Siendo V, la velocidad de escaneo previamente mencionada, 0.02°/μs y To, el tiempo que tarda en pasar el haz por el ángulo 0°. Con ello se consigue una cobertura vertical como la indicada en la figura 8.

La antena receptora será relativamente pequeña, de unos 6 centímetros, debido a la longitud de la onda transmisora [17].

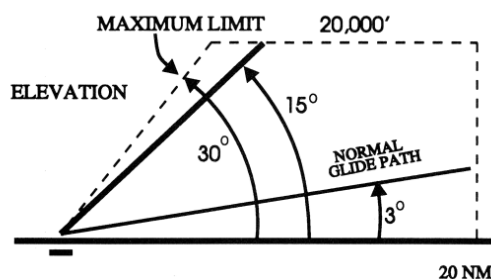


Figura 8: Cobertura vertical de los sistemas MLS

Existen diferentes ventajas en el uso de sistemas como el descrito sobre el ILS, como por ejemplo; la menor susceptibilidad a interferencias generadas por edificaciones como hangares o edificios de núcleos urbanos, que da lugar a posibles aproximaciones con una trayectoria curva; tienen acceso a una mayor cantidad de canales. Sin embargo, la instalación del sistema completo resulta más costosa, simplemente la antena en el receptor cuesta alrededor de 25.000\$. A pesar de la supuesta aceptación que debía de tener en Europa, por los países que tenían condiciones especiales de baja visibilidad, esto no ocurrió, siendo aceptado solo un aeropuerto de gran tamaño, el aeropuerto de Heatrow en Londres, si bien quedó inoperativo el 31 de mayo de 2017 [18].

Debido a su baja aceptación, en Junio de 1993, Estados Unidos y Canada deciden terminar su desarrollo, centrándose en técnicas basadas en GNSS y GPS diferencial, quedando en funcionamiento solamente en aeropuertos donde su trayectoria de descenso necesita sortear obstáculos [18].

3.1.2 GNSS

Los sistemas de posicionamiento y radioayuda por GPS utilizan la tecnología de propagación de ondas para determinar la posición de un objeto en la tierra. Se necesitan las coordenadas exactas del satélite en el espacio para poder medir el tiempo de retardo que sufre la señal viajando desde el emisor (el satélite) hasta el receptor (la aeronave). Midiendo dicho retardo, se puede calcular la distancia entre el satélite y el observador, que será utilizado para calcular la posición del avión en el aire.

Imaginemos un observador recibiendo señales de radio de un satélite. La distancia entre el receptor y el satélite puede ser calculada como se ha mencionado anteriormente, sin embargo existen infinitos puntos en el perímetro de una circunferencia que cumplen con esa distancia, véase figura 9. [19]

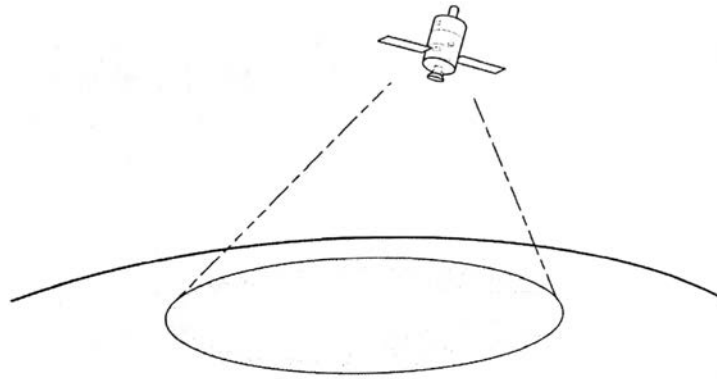


Figura 9: Un único satélite describe una circunferencia en la superficie de la tierra

Sin embargo, esta ambigüedad se reduce si conseguimos medir la distancia del receptor a dos satélites, esto será capaz de identificar dos puntos unívocos sobre la superficie de la tierra como se puede ver en la figura 10

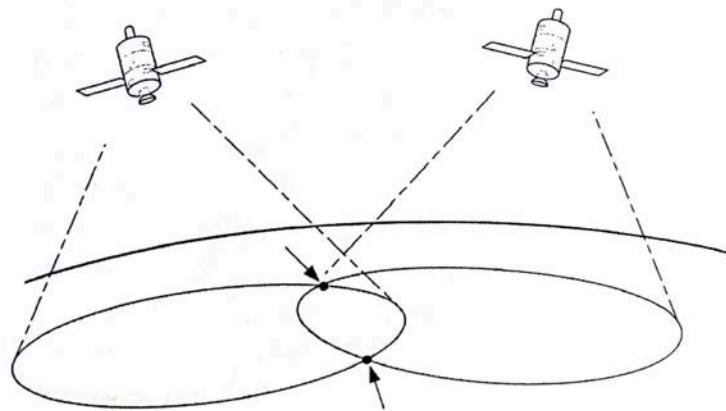


Figura 10: Dos satélites describen 2 puntos unívocos sobre la superficie de la tierra

Si ahora usamos un tercer satélite podemos eliminar toda posible ambigüedad y seremos capaces de definir un punto en dos dimensiones sobre la tierra, es más, si utilizamos 4 satélites conseguiremos describir una posición tridimensional, esto es latitud, longitud y altitud. La precisión de estos sistemas dependerá de la buena visibilidad que tiene el receptor sobre los satélites. Una vez la posición es recibida por el sistema de GPS, se pueden hacer otros cálculos como la velocidad de desplazamiento o el ángulo de inclinación para el descenso [20].

En la actualidad, el gobierno de Estados Unidos se ha comprometido a mantener 24 satélites GPS operativos, para lograrlo, la Air Force ha mantenido 31 de ellos en condiciones de servicio [21]. Cada satélite mide aproximadamente 4,2 metros y órbita a 20.200 km [20]. Dicha órbita es calculada para maximizar el área de tierra cubierta con el menor número de satélites posibles. En cada satélite se instalan 4 relojes atómicos altamente precisos, normalmente mantienen una precisión que varía diariamente en torno a 3 nanosegundos al día, 3×10^{-9} segundos. Orbitan la tierra dos veces al día con una inclinación de 55° respecto al plano ecuatorial, quedando definida una constelación de 6 órbitas, con 4 satélites en cada una de ella.

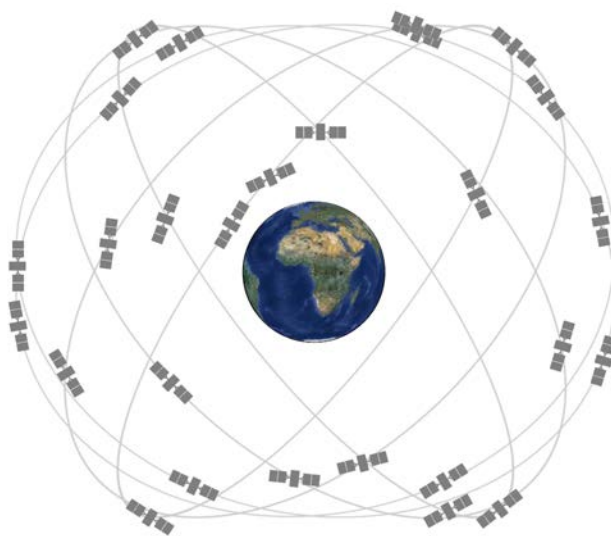


Figura 11: Constelación de satélites alrededor de la tierra [50]

El equipo instalado en los aviones consta de 2 receptores y 2 antenas localizadas en la parte posterior del avión, suelen ser antenas planas de 18x12x2 centímetros [19] siendo capaces por su diseño de rechazar la señal de los satélites que se encuentran a menos de 5° del horizonte.

Sin embargo, pese a la utilidad de sistemas como el explicado, para el posicionamiento y seguimiento de objetos como automóviles, la utilidad de tecnologías básicas de GPS, sin corrección diferencial [22], no resulta útil para el proceso de aterrizaje de aeronaves principalmente por 3 razones:

1. Precisión: El error en el posicionamiento vertical puede llegar a ser de ± 150 metros, los aeropuertos de categoría I requieren un error máximo de ± 8 metros, ± 4 metros para los de categoría II y $\pm 1,3$ metros para la categoría III⁶.
2. Integridad: Tal como está diseñado el sistema GPS carece de un sistema de monitorización que pueda proveer de un aviso por fallos en el proceso de guiado, dentro del tiempo establecido para cada categoría: alrededor de los 10 segundos para categorías I y II y menos de 2 segundos para aeropuertos con categoría III.
3. Disponibilidad: El número de satélites a la vista en ciertas partes de la tierra puede no ser adecuado para un correcto posicionamiento del avión en todo momento.

Para aterrizajes que no requieren de precisión o, incluso, para los de categoría I, las limitaciones que se han expuesto han sido solucionadas desarrollando el sistema WAAS, wide area augmentation system. WAAS (*wide area augmentation system*) es capaz de mejorar la precisión de la señal de GPS de 20 metros a 1.5 metros, tanto en la posición vertical como horizontal. Está basado en una red de estaciones que monitoriza la señal GPS y la compara con la posición conocida y exacta de dichas estaciones. Las estaciones son capaces de almacenar y tratar la información, que es transmitida a una estación principal, desde ahí es enviada, vía un enlace *uplink*, a uno o dos satélites geoestacionarios. Finalmente la señal se transmite a la aeronave y pasa a ser comparada con la señal recibida de los satélites GPS [20].

Por otra parte, para los aterrizajes de categorías más restrictivas esto es, categoría II y categoría III, los requerimientos de una precisión mayor se consiguen mediante la tecnología DGPS, el modelo de funcionamiento es similar al WAAS, ya que aumenta la precisión de los sistemas GPS mediante el uso de estaciones de referencia con posiciones conocidas, realizando una corrección diferencial del error de medida hecho por los satélites GPS, llegando a conseguir una precisión de 15 metros con GPS a 10 centímetros con DGPS[23][24].

Finalmente, quedaría por analizar con más precisión y detalle la ayuda al aterrizaje más utilizada [25] y que ha sido simulada en la presente memoria, el ILS; para ello destinaremos, el capítulo 3 titulado “descripción del entorno de trabajo” así podremos conformar una idea más concisa no solo de la diferencia de los sistemas descritos anteriormente con el ILS, sino de todos los elementos que lo forman.

⁶ El sistema de categorías es un sistema propuesto por la ICAO que sirve para categorizar cada pista de aterrizaje o aeropuerto dependiendo de sus condiciones visuales, siendo la I la menos restrictiva y la III la mayor de ellas, será explicado detalladamente en el capítulo 3.1.

3.2 Alternativas a la herramienta desarrollada

Se han encontrado 3 aplicaciones que también simulan la acción de un sistema de aterrizaje instrumental.

Por una parte tenemos 2 programas de simulación de vuelo; Microsoft flight simulator en su última versión Microsoft flight simulator X [48] y X-Plane [49]. Estos últimos son simuladores de vuelo. Su propósito es el de garantizar experiencias de vuelo enormemente precisas, pudiendo elegir; tipo de avión, todo tipo de condiciones climatológicas, diferentes aeropuertos y numerosos accidentes geográficos. La simulación llega a ser tan precisa que, para el caso de X-Plane la FAA ha aceptado a este software como parte del entrenamiento para futuros pilotos.

Por otra parte existe la herramienta online: http://www.luizmonteiro.com/learning_vor_sim.aspx. Dicha plataforma es más parecida a la herramienta desarrollada en el presente trabajo fin de grado. Permite situar un avión en un punto del espacio y controlar, por medio de las teclas del teclado, los movimientos que queremos realizar. La mayor utilidad de este programa es que posee una herramienta muy gráfica, intuitiva y sencilla de interpretar lo que permite obtener gran conocimiento de cómo se comportan los aparatos en cabina dependiendo de los desplazamientos del avión.

Dichas herramientas, en general, permiten aproximaciones que se asemejan más a situaciones reales de aterrizaje, en comparación con la que se ha desarrollado. Sin embargo, desde el punto de vista educativo, la aplicación simulada es de mayor utilidad que las anteriores, ya que al centrarse únicamente en desarrollar una simulación de ILS los conceptos quedan implementados con mayor claridad. Además, al tener control sobre el código generado podemos implementar cualquier modificación o ampliación, en función de los requerimientos del usuario.

3.3 Regulación

Para la normalización y regulación de los instrumentos de ayuda al aterrizaje existen 2 entidades a mencionar: ICAO⁷ y CNAF⁸(cuadro nacional de atribución de frecuencias), dichas entidades están relacionadas con la regulación del sector aeronáutico a nivel mundial y con la atribución de frecuencias en España respectivamente.

⁷ URL: <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>. Último acceso enero 2018

⁸ URL: <http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/Paginas/CNAF.aspx>. Último acceso enero 2018

3.3.1 ICAO

La organización civil internacional, la fundaron en 1944 los estados miembros de la ONU, para supervisar y gestionar la aplicación del Convenio sobre Aviación Civil Internacional suscrito ese año, y conocido como el Convenio de Chicago [26].

La ICAO trabaja con los 192 estados miembros, para alcanzar consensos sobre estándares de aviación civil internacional y prácticas recomendadas, SARPs (*standards and recommended practices*), desarrollando políticas que apoyen y contribuyan al desarrollo del sector de la aviación civil para que sea más seguro, eficiente, económicamente sostenible y medioambientalmente responsable.

Las políticas regulatorias desarrolladas por los Estados miembros de la ICAO, tienen como objetivo asegurar que sus operaciones de aviación civil a nivel local cumplen con las normas globales acordadas, lo que permite mas de 100,000 vuelos diarios, operando de forma segura en cada región del mundo [27].

3.3.2 CNAF

El Cuadro Nacional de Atribución de frecuencias es un organismo integrado en el Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España. Es el encargado de asignar un determinado rango de frecuencia para cada servicio de telecomunicaciones. El espectro radioeléctrico de que dispone va de los 8,3 kHz hasta los 3000 GHz [28].

El CNAF fue publicado en 1990 y es un documento que requiere constantes actualizaciones y cambios debido a la actividad de otros organismos similares a nivel europeo, como la UIT (unión internacional de telecomunicaciones), CEPT (Conferencia Europea de administraciones de correos y telecomunicaciones), UE (Unión Europea) y ETSI (*European telecommunications standards Institute*) cuyas nuevas regulaciones y norman apuntan a una armonización de la utilización del espectro radioeléctrico.

Para sistemas de radionavegación como el ILS, el CNAF asigna la banda de 108 - 117,975 MHz para las antenas de posicionamiento horizontal y la de 328,6 - 335,4 MHz para las antenas transmisoras de la senda de planeo [29].

ATRIBUCIÓN NACIONAL	USOS	OBSERVACIONES
75,2 – 137,175 MHz		
75,2 - 87,5 FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico	• •	UN-132, UN-154, UN-156 * Usos M y C (según notas UN)
87,5 - 108 RADIODIFUSIÓN	P	UN-17 Radiodifusión sonora en ondas métricas (FM)
108 - 117,975 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	R	5.197A

ATRIBUCIÓN NACIONAL	USOS	OBSERVACIONES
220 – 335,4 MHz		
273 - 312 FIJO MÓVIL	R R	5.254 UN-28, UN-154, UN-156
312 - 315 FIJO MÓVIL Móvil por satélite (Tierra-espacio)	R R R	5.254 5.255 UN-28, UN-154, UN-156
315 - 322 FIJO MÓVIL	R R	5.254 UN-28, UN-154, UN-156
322 - 328,6 FIJO MÓVIL RADIOASTRONOMÍA	R R R	5.149 UN- 28, UN-154, UN-156
328,6 - 335,4 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	R	5.258 LIMITADA A LA RADIOALINEACIÓN DE DESCENSO (ILS) UN-28, UN-154

Figura 12: Cuadro de frecuencias para radionavegación ILS

3.4 Marco socioeconómico

El marco social y económico va a ser analizado desde dos puntos de vista: por un lado cuál es el impacto que tienen los aparatos de ayuda a aterrizaje y la radionavegación y; por otra, por las implicaciones que pueden tener simulaciones como la desarrollada en la sociedad de hoy en día.

Para evaluar el impacto, resultará de gran utilidad acudir a un estudio que hizo la empresa BOEING⁹ titulado “*Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations / 1959 – 2016*” [30], en el cual se estudia, entre otras cosas, el número total de accidentes aéreos desde 1959 hasta 2016, así como sus causas y sus posibles implicaciones.

⁹ URL: <http://www.boeing.es/>. Último acceso enero 2018

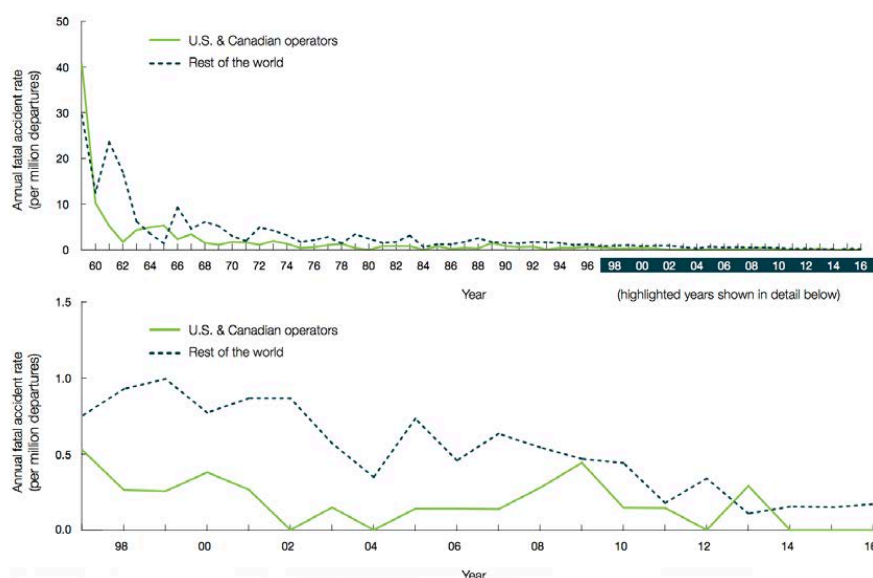


Figura 13: Gráfico Total de accidentes - Año

En la figura 13 se puede observar cómo han disminuido exponencialmente el número de accidentes graves con el paso de los años, pese al incremento total del número de vuelos. Esto es debido al desarrollo de nuevas tecnologías, como las que aparecen en esta memoria, que hacen que el transporte aéreo sea uno de los medios de transporte más seguros en la actualidad [30]; traduciendo estos datos inmediatamente, no solo a la reducción del número de personas que resultan heridas en sus desplazamientos por aire, también al ahorro de dinero invertido en dichos accidentes.

Otro estudio que puede resultar relevante es el que realizó la compañía aérea holandesa KLM¹⁰, analizando el periodo de 1996 hasta 2009, evaluando cuánto dinero habría perdido si sus aeronaves no hubieran podido aterrizar en situaciones de Categoría III, estimando un total de 53 millones de dólares[5].

En cuanto a los efectos positivos de la utilización de procedimientos, hay que valorar el hecho de que para configurar las antenas de localización y transmisión de la senda de planeo, se necesita volar un avión especialmente preparado para dicha función. Es de gran relevancia apuntar que en España solo disponemos de una nave con esas especificaciones. Lo que se traduce en un proceso costoso y poco eficiente. La implantación en un hardware como puede ser una Raspberri Pi¹¹, para su posterior instalación en drones, haría que el proceso de configuración resultase más económico, no solo porque cada aeropuerto tendría la posibilidad de adquirir uno de estos drones,

¹⁰ URL: <https://www.klm.com/home/es/es>. Último acceso enero 2008

¹¹ URL: <https://www.raspberrypi.org/>. Último acceso enero 2008

sino porque así se evitaría tener que volar un avión cada vez que los sistemas requieran mantenimiento o configuración.

Capítulo 4.

Descripción del entorno de trabajo

En el presente capítulo se describirá el escenario completo del sistema simulado, y se explicarán detalladamente los diferentes elementos y características técnicas que conforman un sistema de aterrizaje instrumental ILS.

4.1 Descripción del escenario

Como ya hemos comentado en apartados anteriores de la presente memoria, un sistema ILS se compone principalmente de 3 elementos, cada uno de los cuales consta de un transmisor en tierra y una señal recibida y procesada por un receptor en la aeronave.

La ayuda al posicionamiento lateral la ofrece el primero de esos elementos, la antena de localización, *localizer*, la antena que provee información de la trayectoria de descenso vertical, *glide slope*, y las radiobalizas, *marker beacons*, las cuales informan de la distancia del avión a la pista de aterrizaje durante 3 localizaciones del descenso. Todos estos elementos han sido simulados independientemente quedando un sistema como el representado en la figura 14

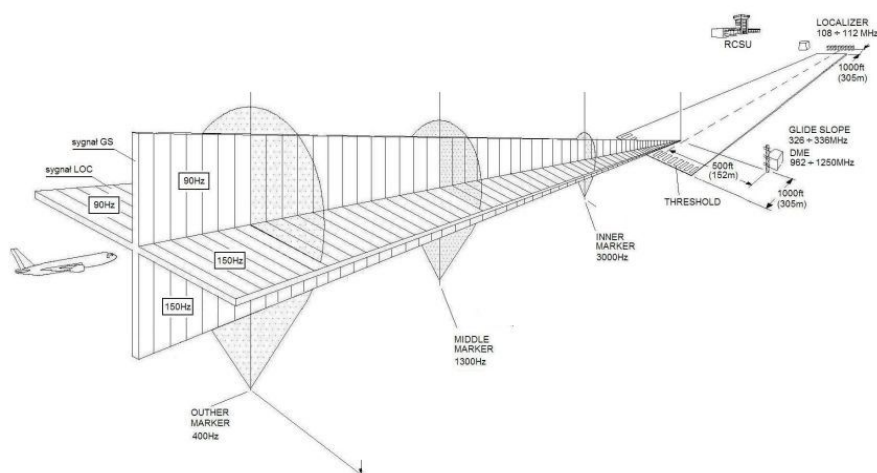


Figura 14: Sistema ILS [45]

Antes de describir las especificaciones de cada sistema, es necesario (como se ha comentado previamente en la memoria) definir las diferentes tipos de aproximaciones definidas por la ICAO en función cada situación de visibilidad.

Existen 2 tipos de aproximaciones: las que no requieren precisión, donde previsiblemente las condiciones de visibilidad serán idóneas, y solo se requiere proveer de direccionamiento vertical; y las de precisión que, según la ICAO, se dividen en 3 categorías diferentes, que se detallan en la tabla 2 [32]:

Categoría	Decision Height	Runaway Visual Range
Categoría I	60 metros (200 ft)	800 metros (2600 ft)
Categoría II	30 metros (100 ft)	400 metros (1200 ft)
Categoría IIIA	-	200 metros (700 ft)
Categoría IIIB	-	30 metros (150 ft)
Categoría IIIC	-	0

Tabla 2: Categorías de visibilidad ICAO¹²

El tipo de categoría determinado para cada aterrizaje será un factor crucial a la hora de configurar los sistemas ILS. Cuanto más complicado, visualmente hablando, es el aterrizaje, los requisitos que el aeropuerto debe cumplir son mayores. A partir de CAT II se requieren luces centrales a lo largo de la pista de aterrizaje, requerirá también una mayor precisión de los sistemas ILS, por lo que puede ser necesario la utilización de antenas con una mayor directividad o, incluso, la eliminación de ciertos elementos que puedan causar distorsión y rebotes en la señal como pueden ser; superficies reflectoras o edificios así como, mayor fiabilidad y exactitud de los sistemas receptores de la señal en el avión[17].

4.1.1 Localizer

Desde el punto de vista del espectro de frecuencias utilizado, se asignan 40 canales separados 50kHz en la banda de 108,10 a 111,95 MHz, usando solamente las frecuencias cuyas décimas son impares; por lo ejemplo 108,11MHz y 110,35MHz serán frecuencias a utilizar, mientras que 108,21MHz y 110,45MHz no lo serán. Aquellos

¹² El término *decision height* se refiere a la altura a la que hay que iniciar la maniobra de aproximación frustrada, en caso de que no se tenga contacto visual con las referencias y ayudas visuales presentes en la pista de aterrizaje [33].

El término *runaway visual range* se refiere a la distancia a la que el piloto de una aeronave, en maniobra de aterrizaje, debe poder tener contacto visual con la pista.[33]

canales donde no se pueda asignar frecuencias irán asignados al VOR¹³. Las antenas que se requieren para generar la señal son un array lineal de hasta 26 elementos situados al final de la pista de aterrizaje.

La cobertura del localizador será normalmente como aparece en la figura 15, aunque esta podrá variar enormemente dependiendo de la topografía del terreno donde esté situado.

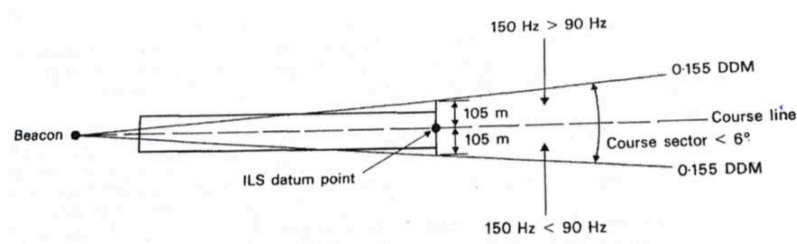


Figura 15: Cobertura horizontal de un sistema ILS

La señal portadora está modulada en AM a 90 Hz y 150 Hz de tal forma que un avión, situado durante el descenso a la izquierda del centro de la pista, estará sobrevolando una región donde predomina la señal modulada a 90 Hz; si el piloto decide corregir el rumbo, y se sitúa sobre la línea central, se recibirá una potencia similar de las dos señales; mientras que si se desvía a la derecha, recibirá una mayor potencia de la señal modulada a 150 Hz. La desviación de la posición correcta viene dada en DDM, *difference in depth modulation*, esto es, el porcentaje de modulación de la señal de mayor potencia menos el porcentaje de modulación de la señal con menor potencia dividido entre 100 [34].

La trayectoria del localizador, se define como el sector del plano horizontal que contiene la trayectoria horizontal correcta de descenso y limitado, a la derecha e izquierda, por un DDM de 0,155. Como se puede observar en la figura 15 esto se traduce a una desviación máxima de $\pm 3^\circ$ respecto a la horizontal.

En el receptor se reciben ambas señales, la de 90 Hz y la de 150 Hz lo que causará una desviación en el indicador en cabina, mostrando el comando de girar a la izquierda o a la derecha, si el piloto consigue mantener un rumbo con DDM igual o cercano a cero, el avión se aproximará a la pista a lo largo de su correcto recorrido horizontal.

¹³ La tecnología VOR será explicada más en detalle en el capítulo 5.1

4.1.2 *Glide Slope*

Los canales de la antena transmisora de la senda de planeo vertical se sitúan en la banda de UHF, más concretamente, se le asignan las frecuencias entre 328,6 y 335,4 MHz espaciadas 150 kHz cada una. En total están disponibles 40 frecuencias las cuales están emparejadas con una frecuencia del *localizer*, representadas en la tabla 3. El piloto en cabina simplemente tendrá que seleccionar la frecuencia que usara para la antena localizadora, lo que automáticamente hará que los dos receptores se sintonicen a las frecuencias apropiadas [35].

<i>Localizer</i> (MHz)	<i>Glide path</i> (MHz)	<i>Localizer</i> (MHz)	<i>Glide path</i> (MHz)
108.1	334.7	110.1	334.4
108.15	334.55	110.15	334.25
108.3	334.1	110.3	335.0
108.35	333.95	110.35	334.85
108.5	329.9	110.5	329.6
108.55	329.75	110.55	329.45
108.7	330.5	110.7	330.2
108.75	330.35	110.75	330.05
108.9	329.3	110.9	330.8
108.95	329.15	110.95	330.65
109.1	331.4	111.1	331.7
109.15	331.25	111.15	331.55
109.3	332.0	111.3	332.3
109.35	331.85	111.35	332.15
109.5	332.6	111.5	332.9
109.55	332.45	111.55	332.75
109.7	333.2	111.7	333.5
109.75	333.05	111.75	333.35
109.9	333.8	111.9	331.1
109.95	333.65	111.95	330.95

Tabla 3: Emparejamiento de frecuencias del localizer y glide solape

El funcionamiento del *glideslope* es similar al del *localizer*, ya que se compone de dos señales portadoras moduladas en amplitud a 90 Hz y 150 Hz. Por encima de la correcta trayectoria de descenso vertical predomina la modulación a 90 Hz, por debajo la de 150 Hz y en el centro la potencia recibida de las dos señales será la misma, produciendo un DDM igual a 0 [35].

La cobertura de las señales se muestra en la figura 16, siendo el ángulo correcto de descenso entre $2\frac{1}{2}^{\circ}$ hasta 3° . Para las categorías I pueden tener sectores superiores e inferiores asimétricos, así se ha propuesto en nuestra simulación. La desviación máxima

que tolerable es de $0,0875 \text{ DDM}$ lo que supone una variación de $0,070\Theta$ hasta $0,140 \Theta$ ¹⁴. Para categorías con visibilidad más reducida como la Categoría III estos ángulos se reducen a $0,02 \Theta$ y $0,12 \Theta$ [35].

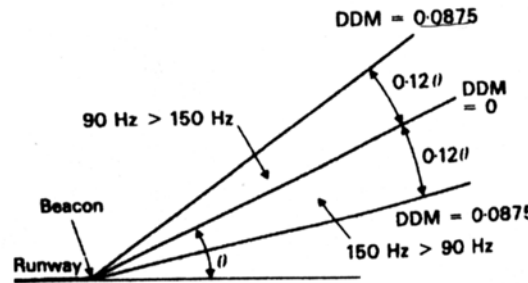


Figura 16: Cobertura vertical de un sistema ILS

El principal problema del funcionamiento de estos sistemas son los falsos nulos de DDM, que aparecen en trayectorias diferentes a la deseada. Los primeros nulos ocurren a 2Θ , 3Θ y 4Θ , estos no son estables lo que significa que no mantienen una trayectoria constante de descenso por lo tanto si el piloto obedece los comandos de direccionamiento no se mantendrá el correspondiente ángulo de descenso. El primer nulo estable aparece a los 5Θ , es decir, para un aterrizaje a 3° aparecerá a los 15° , dicha diferencia es lo suficientemente grande como para no crear confusión a los pilotos de la aeronave, aunque normalmente para evitarlos se recomienda “capturar” la señal a 0 DDM desde abajo.

Finalmente una vez que el avión sobrevuela la zona de cobertura del *glideslope*, las indicaciones aparecerán en los mandos de forma similar a la del localizador, donde se indicará al piloto si esta volando por encima o por debajo de la trayectoria correcta[5]. En este caso los arrays de antenas estarán situados al principio de la pista de aterrizaje.

4.1.3 Radiobalizas

Las radiobalizas, en inglés *marker beacons*, son balizas radiando perpendicularmente a la tierra, a una frecuencia de 75 MHz . La modulación de cada señal será diferente para cada tipo de radiobaliza.

¹⁴ Tomamos el ángulo theta como el ángulo de descenso que tenga dicha aproximación.

Dependiendo del aeropuerto y de las condiciones del terreno se instalarán 2 (las más exteriores) o 3. Para este proyecto se han simulado 3. Las 3 son, la exterior, *outer marker*, la intermedia, *middle marker*, y la interior, *inner marker*.

La radiobaliza exterior está normalmente localizada entre 4 y 7 millas náuticas desde el final de la pista de aterrizaje; la señal portadora está modulada a 400 Hz y configurada para producir 2 rayas¹⁵ por segundo, lo que será escuchado por el piloto en el interior de cabina. Además, emite una señal luminosa de color azul [36].

La baliza intermedia se sitúa a 3500 pies de distancia de la pista, en este caso la señal portadora se modula a 1300 Hz, y se configura para que emita puntos y rayas 95 veces por minutos que serán también escuchadas en la cabina, y producirá unos destellos de color ámbar [36].

Finalmente la radiobaliza interior, esta solo se instala en las categorías II y III en la parte final del aterrizaje, a una distancia que varía de 75 metros a 450 metros desde el final de la pista. La señal es modulada a 3000 Hz lo que producirá puntos y rayas cada 6 segundos igualmente audibles en cabina, y una luz blanca [36].

4.1.4 Equipos receptores

Los equipos receptores son el conjunto de sistemas instalados en las aeronaves para la correcta recepción, demodulación e interpretación de la señal producida por los arrays de antenas.

El sistema receptor se compone de 3 antenas: una para la señal del *localizer*, otra para el *glide path*, y finalmente, otra para las radiobalizas

La antena receptora del localizador es la misma que se usa para recibir el VOR, situada en la parte del estabilizador vertical del avión¹⁶. Por otro lado la recepción de la señal del *glide path* se produce a través de una antena situada en el morro del avión, dentro del radomo¹⁷ junto a la antena receptora de la señal del radar, lo que puede llegar a causar ciertas interferencias.

Finalmente la recepción de las señales de las radiobalizas se realiza desde una antena situada por debajo del fuselaje del avión, normalmente en la parte izquierda. Los receptores son relativamente simples ya que la “única” función que tienen que realizar

¹⁵ El término raya hace referencia al código Morse

¹⁶ El estabilizador vertical se encuentra en la parte trasera del avión cercano a la cola.

¹⁷ El radomo es una funda colocada en las antenas para protegerlas sin que esto afecte a sus propiedades electromagnéticas [37].

es sintonizar la frecuencia apropiada para cada elemento del ILS, demodularla y generar las señales que pasarán a ser interpretadas por los aparatos en cabina. [17]

El diagrama de bloques que simula el funcionamiento del sistema, se representa en la figura 17 [17].

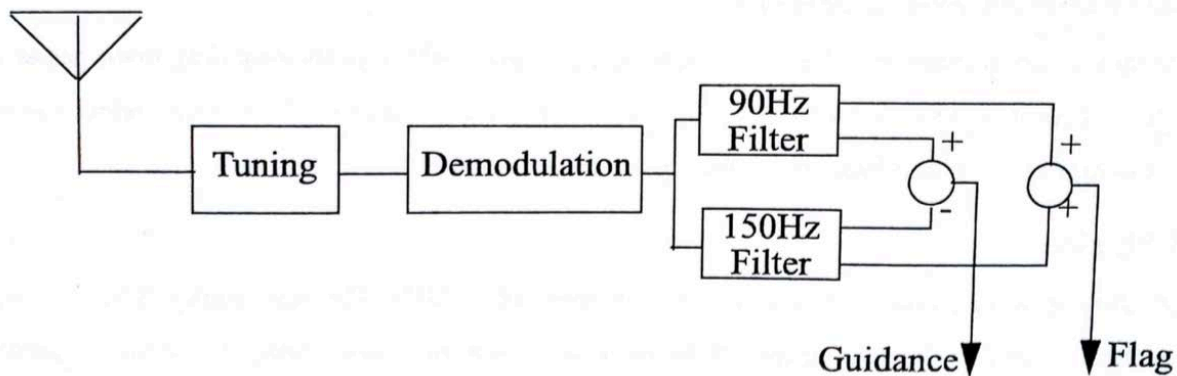


Figura 17: Diagrama de bloques de un receptor ILS

4.2 Inconvenientes y limitaciones del ILS

La mayor limitación de sistemas como el descrito, es su gran sensibilidad al entorno. El ILS opera con unos diagramas de radiación muy estrechos lo que requiere estructuras de array especialmente largas. Es tremendamente sensible a los rebotes de la señal producidos por otras aeronaves, edificios y terrenos elevados, lo que puede llevar a una desviación de la trayectoria definida por los patrones de radiación. Para reducir este inconveniente se definen, en las pistas de aterrizaje, zonas llamadas *ILS critical areas*, las cuales son áreas que no se pueden obstaculizar por ningún aparato mientras los sistemas ILS están en funcionamiento [38].

Por otra parte las frecuencias que se manejan se encuentran cercanas a las asignadas a la radio FM, por lo que tiene que ser un factor a tener en cuenta para evitar posibles interferencias.

Finalmente, cabe destacar que este sistema de aproximación solo puede definir trayectorias de descenso rectas por lo que no podrá utilizarse en descensos que requieran sobrevolar ciertos terrenos irregulares o cuando se necesite desarrollar trayectorias curvas de descenso.

Capítulo 5.

Desarrollo de la Simulación

En el presente capítulo se detallará cómo se ha realizado la simulación de los diferentes sistemas que forman el sistema.

Como hemos mencionado anteriormente, la simulación completa permite al usuario elegir un punto de partida para situar el avión así como la velocidad tanto del avión como del viento. Una vez indicados dichos parámetros iniciales, el avión analiza las señales recibidas del *localizer*, del *glide slope* y los avisos para aumentar o disminuir la velocidad, lo que hace que, tras interpretar y procesar la información, decida automáticamente cuál va a ser su siguiente punto en el plano.

Las condiciones que se han impuesto a la simulación hace que el avión pueda aterrizar correctamente independientemente del punto de partida o de la velocidad elegida, ya que es capaz de corregirlo durante el vuelo, el único elemento que puede alterar el correcto aterrizaje de la aeronave es el viento.

A continuación se pasará a detallar cómo se ha simulado cada elemento para finalmente centrarnos en analizar el funcionamiento del sistema completo.

5.1 Simulación del *Localizer*

La primera tarea a la hora de simular el localizador es definir los patrones de radiación de las dos antenas, que radiaran las señales moduladas a 90 Hz y a 150 Hz. Para dicho patrón se requiere que tenga gran directividad, para una mayor precisión del sistema y para un ajuste con la cobertura que propone la ICAO.

El diagrama de radiación que se define en la figura 18 es el diagrama de radiación de una de las señales, concretamente la que está modulada a 150 HZ, siendo la zona amarilla la que recibe una mayor potencia de la antena y la azul la que menos. La información que nos aportará los patrones de radiación, como el de la figura 18 será el

porcentaje de potencia¹⁸ que llegará a un receptor, dependiendo del punto del plano en el que se sitúe.

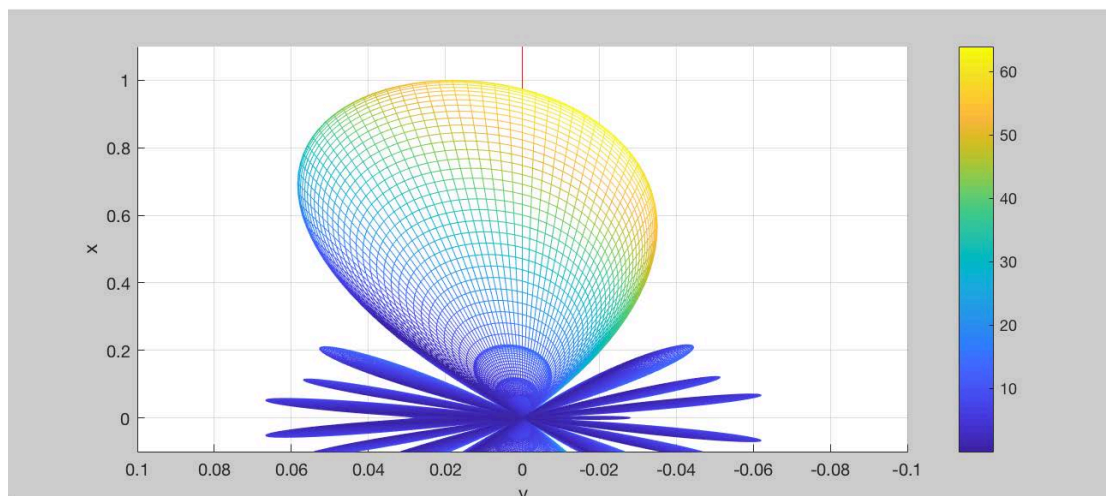


Figura 18: Patrón de radiación de la antena a 150 Hz del localizador

Para obtener el diagrama de radiación necesario para guiar la posición horizontal del avión basta con “sumar” al diagrama de radiación anterior otro simétrico que radiará la señal modulada a 90 Hz, quedando un diagrama total como el de la figura 19.

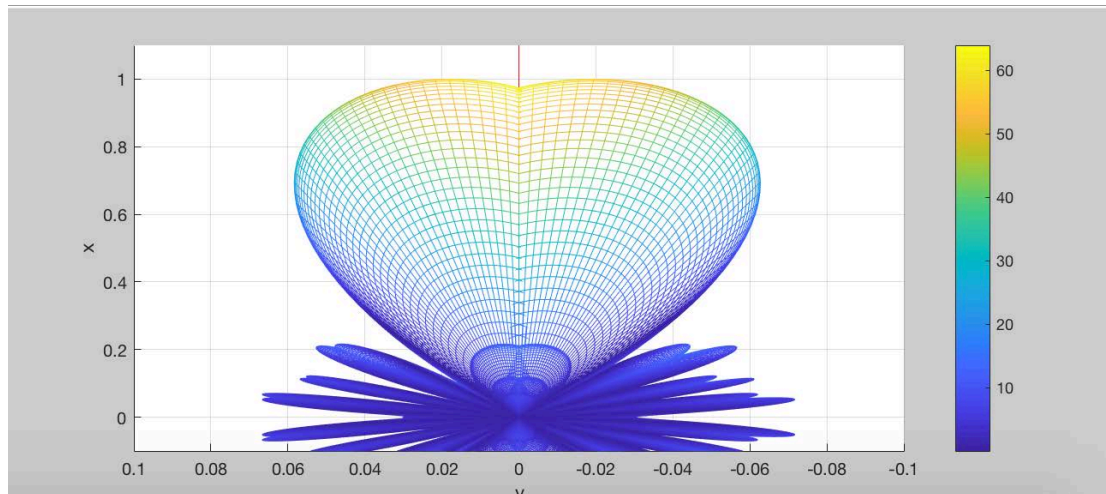


Figura 19: Patrón de radiación de las antenas del localizador

La configuración de las dos antenas hace que a lo largo del plano 0, la potencia recibida de las dos señales sea idéntica, lo que hará que en el cálculo del DDM dé 0 o un valor muy cercano a él.

¹⁸ Se ha decidido tomar valores naturales para indicar cuanta potencia llega al receptor en vez de logarítmicos

En la parte de la presentación al usuario, se simulan los últimos 100 metros de la aproximación del avión, eje X de la figura 20. Utilizando dicha representación será mas fácil elegir un punto inicial en X y en Y para el avión siendo el punto (0,0) donde debe aterrizar el la nave para completar un aterrizaje satisfactorio.

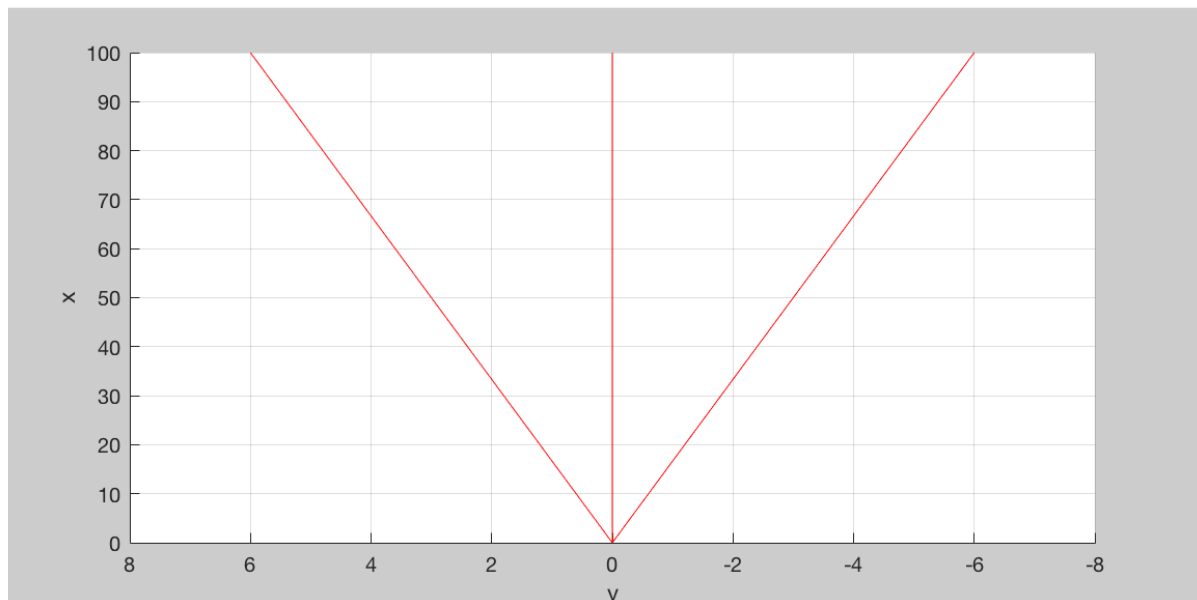


Figura 20: Esquema para el posicionamiento horizontal de avión

La línea roja del plano 0 representa la trayectoria de descenso horizontal correcta para completar el aterrizaje, mientras que las líneas rojas laterales indican la zona de cobertura de la antena simulada, siguiendo las especificaciones de la ICAO comentadas en el capítulo 3. Por lo tanto el usuario debe tener en cuenta que para el correcto funcionamiento de la simulación, debe situar el avión “dentro” de las líneas rojas laterales, ya que esto asegurará un aterrizaje satisfactorio, mientras que si lo sitúa fuera se pueden producir errores de cálculo, lo que conllevará un fallo en la simulación.

Las señales que se utilizan son señales sinuosidades, habiéndose elegido una frecuencia para el localizador de 108,15 MHz. Una vez definidos estos parámetros el avión en cada punto recibe una señal procedente de las dos modulaciones de la señal radiada. La antena receptora se ha programado de tal manera que para que se pueda sintonizar a la frecuencia utilizada, demodule la señal recibida en AM y pase la señal por dos filtros, uno de 90 Hz y otro de 150 Hz; de este modo se puede calcular la potencia que llega de cada señal. Con los datos de potencia recibida, se procede a calcular el DDM y una vez calculado, el avión sabrá que, si no es 0 y la potencia que recibe de la señal modulada a 90 Hz es mayor que la modulada a 150 Hz, está situado a la derecha del punto central y por lo tanto tiene que girar a la izquierda; si por el contrario el DDM no es 0 y recibe más de 150 Hz que de 90 Hz el avión estará situado a la izquierda de la posición correcta y deberá girar a la izquierda; finalmente si se calcula el DDM y es 0, el avión interpretará que se encuentra en la posición horizontal

adecuada. Estos cálculos se ejecutan cada vez que el avión cambia de posición, de esta forma siempre se elige el movimiento correcto a medida que el avión avanza, y es lo que permite que al final del vuelo, este siempre consiga alinearse con la horizontal sin importar su posición inicial.

5.2 Simulación del *Glide Slope*

El modelo de funcionamiento de la antena transmisora de la senda de planeo es similar al de la antena localizadora y por tanto la simulación será parecida. En este caso, también se modulan dos señales en amplitud a 90 Hz y 150 Hz, a esas dos señales le corresponde una sinusoidal a 334,55 MHz. Dicha frecuencia ha sido elegida atendiendo a los criterios indicados en la tabla 3. Se definen sendos diagramas de radiación con gran directividad para aumentar la precisión de la trayectoria, análogamente al caso de la antena localizadora.

En la figura 21 podemos observar el diagrama de radiación de una de las antenas, concretamente la que radia por encima de la trayectoria de descenso, modulada a 90 Hz. La zona amarilla será la zona donde la antena radia la máxima potencia mientras que la zona azul la que menos. Como en el caso del localizador, con la orientación de las antenas se intenta que emitan la máxima potencia en la zona cercana a la trayectoria de descenso, haciendo coincidir los dos haces para que, justo en la trayectoria que debe definir el avión se reciba la misma potencia de ambas señales.

Una vez se consigue definir el patrón de radiación de una de las antenas, simplemente queda cambiar la fase de dicho diagrama hasta obtener otro idéntico con distinta orientación, haciendo que coincidan en el punto deseado como se ha indicado anteriormente. En este caso en la simulación se ha conseguido diseñar un patrón como el de la figura 22.

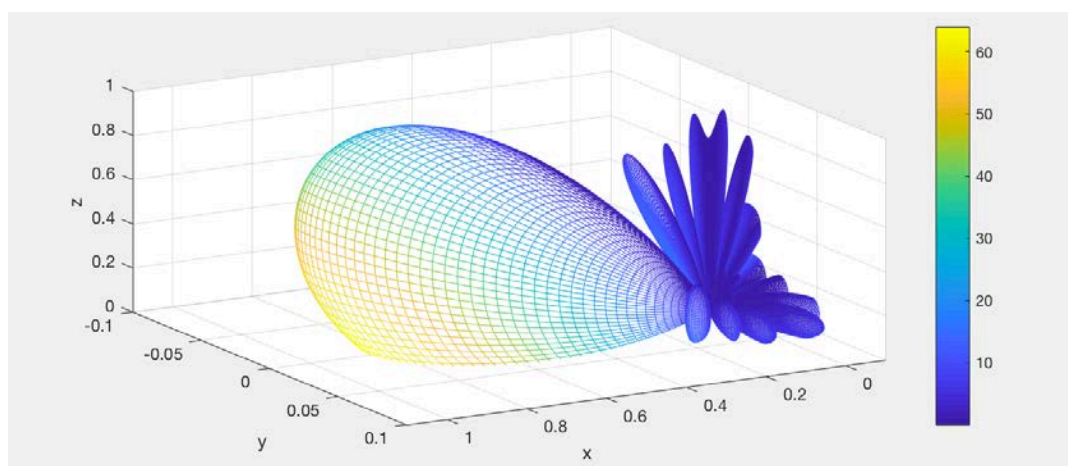


Figura 21 Patrón de radiación de la antena a 90 Hz del *glide slope*

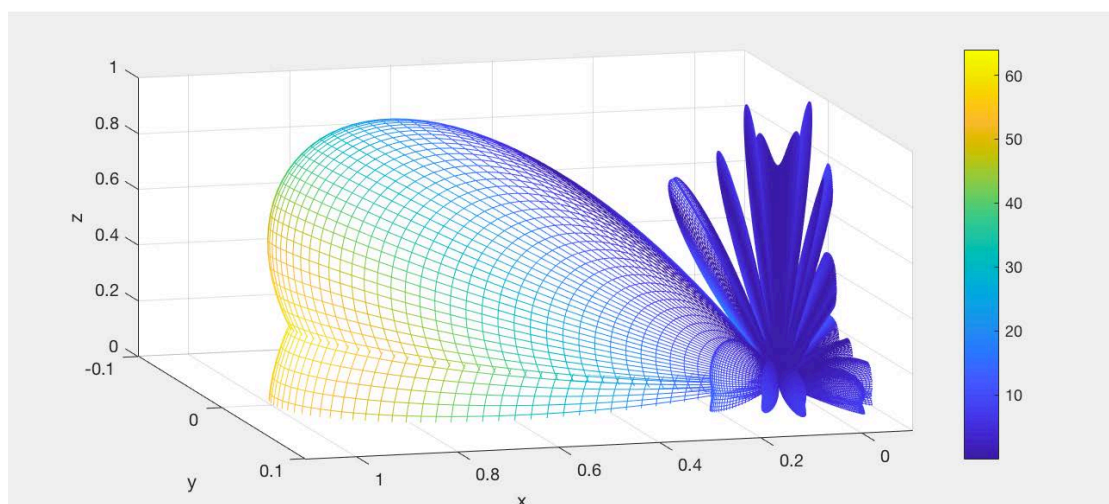


Figura 22: Patrón de radiación de las antenas del glide slope

Definidos ya sendos diagramas de radiación, configuramos las dos antenas para que radien la señal deseada, una señal sinusoidal a 334,55 MHz, modulada en AM a 90 Hz, por encima de la trayectoria y a 150 Hz por debajo. El funcionamiento del equipo simulado en el avión es idéntico al proceso realizado para el *localizer*: se recibe una señal que se filtra a 90 Hz y a 150 Hz, una vez tratada la señal, el avión ya conoce cuanta potencia se recibe de cada una, por lo tanto, si se recibe más potencia de la señal modulada a 90 Hz, es capaz de reconocer que se encuentra por encima de la trayectoria adecuada y deberá descender, mientras que, si de la que recibe mayor potencia es de la de 150 Hz sabrá que está volando demasiado bajo y tiene que ascender hasta que corte con la trayectoria idónea, donde se encontrará en un punto en el que recibirá la misma potencia de las dos señales.

Dicho proceso se ejecuta cada vez que la aeronave cambia de posición. Llegados a este punto ya hemos simulado las dos antenas necesarias para guiar el avión, y este será capaz de decidir en cada instante hacia donde tiene que dirigirse, evaluará el DDM de las señales horizontales y cambiará su posición a la derecha o a la izquierda y lo mismo hará con el DDM calculado de las antenas verticales decidiendo si ascender o descender.

Para hacer más sencillo el posicionamiento inicial del avión se han simulado los últimos 100 metros de la aproximación, figura 23. Siguiendo los parámetros definidos por la ICAO, la trayectoria correcta de descenso se ha situado a 3° , siendo la línea roja de en medio, la línea superior define la máxima desviación superior que se permite, siendo esta $1,75\Theta$, y la línea inferior la mínima quedando definida a $0,45\Theta$

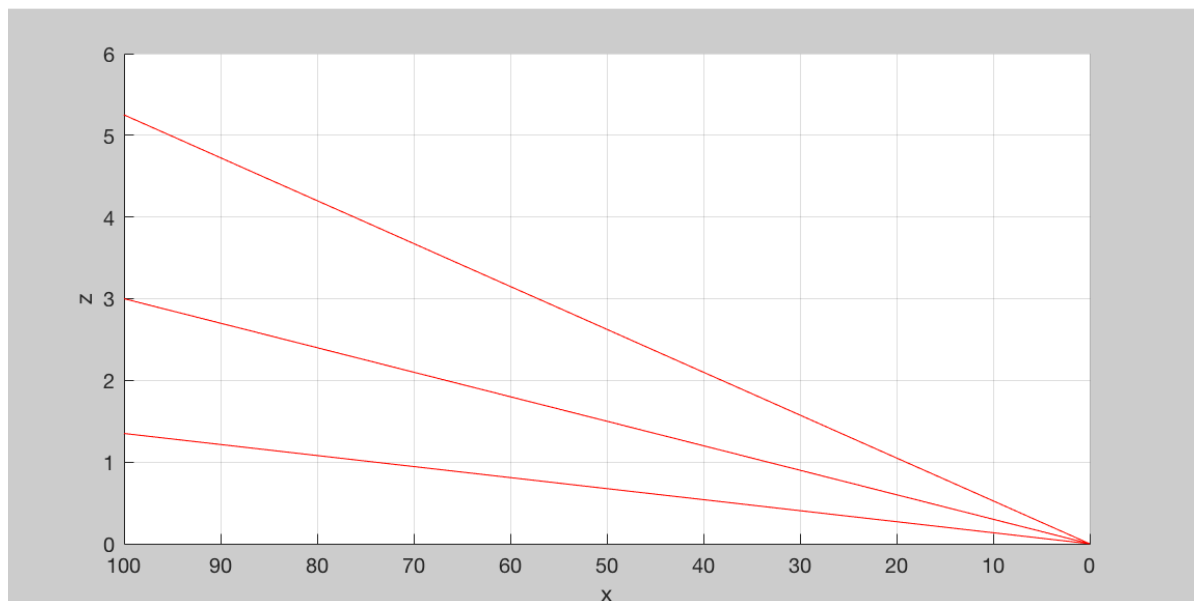


Figura 23 Esquema para el posicionamiento vertical de avión

5.3 Simulación del Indicador de Trayectoria

Una vez conocemos la posición del avión en cada punto, dicha información es “enviada” a la cabina para la interpretación de la potencia recibida por la instrumentación, reflejando así de forma visual las correcciones que el piloto tiene que hacer durante el vuelo. Dicho sistema también ha sido simulado, quedando como se muestra en la figura 24.

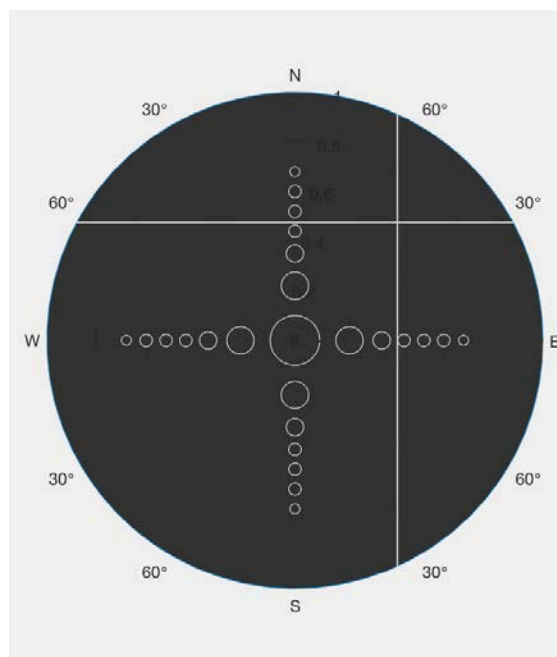


Figura 24: Indicadores de posición en cabina

Inicialmente, si el avión se sitúa fuera de la trayectoria correcta, las líneas aparecerán separadas de la horizontal y vertical, a medida que la simulación avance, el avión ira corrigiendo la velocidad y, por lo tanto, la línea horizontal como vertical aparecerán alineados correctamente como se puede observar en la figura 25.

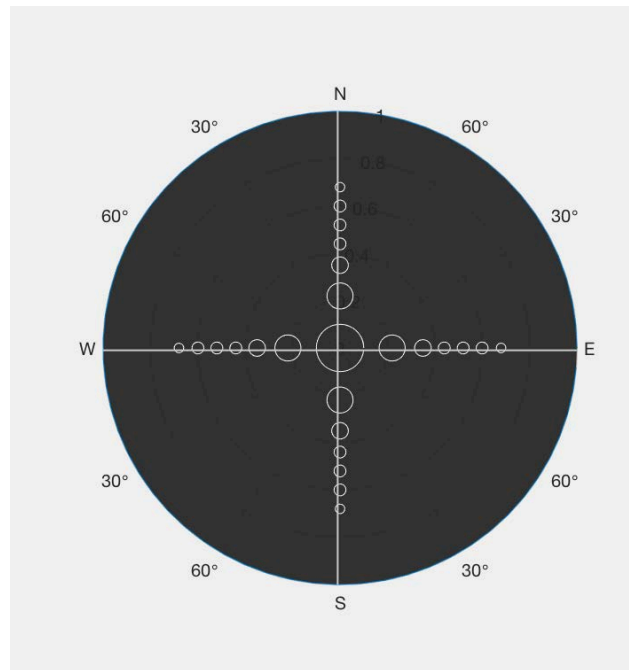


Figura 25: Indicadores de posición en cabina

5.4 Simulación de los *Marker Beacons*

Para terminar la simulación del sistema, quedarían únicamente las balizas de señalización, que como se ha indicado anteriormente, proveen al piloto de señalizaciones que alertan de la distancia horizontal a la pista de aterrizaje.

Se han simulado 3 de ellas: la interior, pintada de gris, la intermedia de naranja y la exterior de azul, figura 26. Las balizas no se han podido colocar siguiendo los estándares de la ICAO ya que al haberse simulado solamente los últimos 100 metros, si se situaban en sus posiciones reales la baliza intermedia y la interior se solaparían resultando un gran inconveniente, en términos operativos, para la simulación así que se decidió situarlas en lugares donde estuvieran lo suficientemente separadas como para resultar útiles a la hora de ejecutar el sistema.

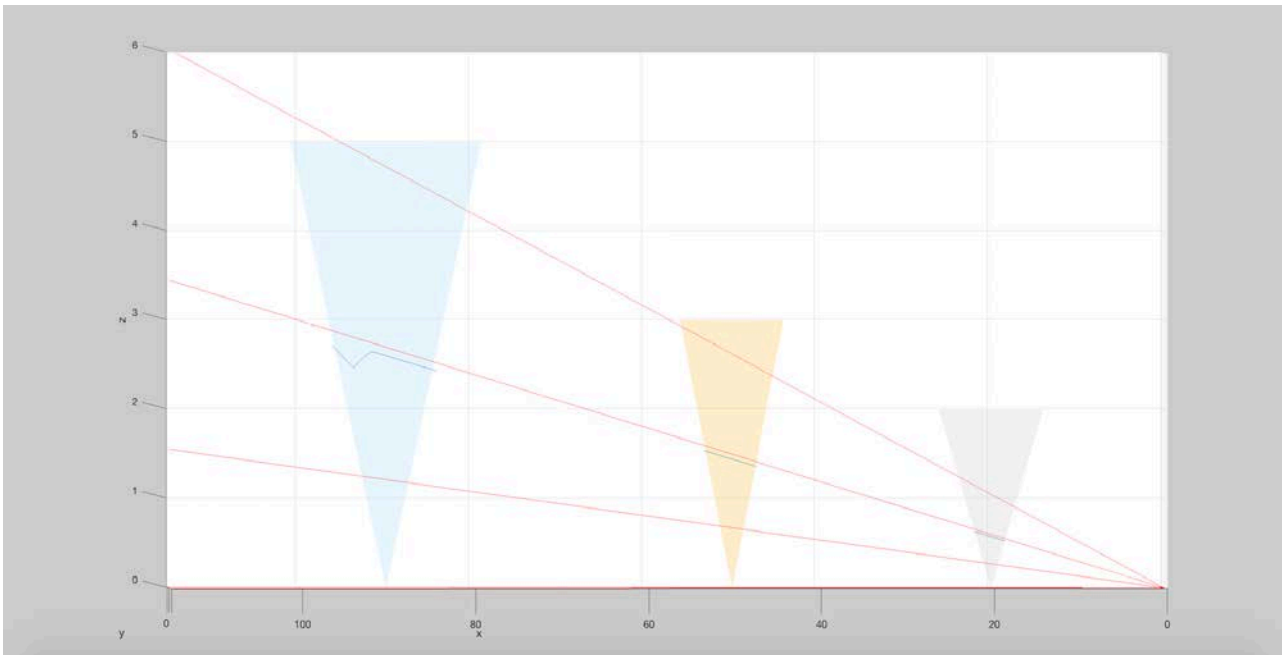


Figura 26: *Marker beacons* simulados

Las radiobalizas emiten una señal sinusoidal modulada a 75 MHz, la cual produce un tono diferente dependiendo de cual sea la baliza que está sobrevolando el avión en ese momento. Cuando la aeronave sobrevuela la zona azul, la simulación está programada para producir tonos a 400 Hz, posteriormente cuando el avión pasa por la zona naranja se emiten tonos audibles a 1300 Hz para terminar con la zona grisácea que emite tonos a 3000 Hz. Dichas frecuencias si que son estándares de la ICAO y producen 3 tonos diferentes, siendo el de la baliza exterior el más grave de los tres y la interior la más aguda.

Con la implantación del sistema de balizas queda totalmente simulado el sistema ILS, quedando por describir los factores externos simulados.

5.5 Simulación de la velocidad del avión y del viento

Para realizar una simulación que se pueda semejar a una situación de aterrizaje real, se han simulado dos factores críticos a la hora de realizar una maniobra de aproximación, que son la velocidad a la que el avión se encuentra volando y la velocidad del viento.

Son dos parámetros que pueden suponer una posible futura línea de trabajo para la continuación del presente proyecto, ya que se han priorizado otros factores y por tanto,

para la velocidad del avión solo se ha configurado las opciones de alta, normal y baja. En el caso del viento, se podrá elegir en que dirección se quiere simular su efecto.

En el caso, de que el usuario seleccione la opción normal la simulación se desarrollara a la velocidad óptima de planeo y las correcciones solo serán de posicionamiento, tanto vertical, como horizontal. En el caso de que se elija la opción de velocidad alta el avión iniciará la simulación volando a una velocidad por encima de la recomendada, esto hará que no descienda lo suficiente; la velocidad a la que se calcula y ejecuta el algoritmo es la misma que cuando el avión tiene una velocidad normal por lo tanto al ir más deprisa el avión no podrá corregir su posición correctamente y tenderá a ascender más de lo debido. Cuando el usuario elige la opción de velocidad baja el avión no ascenderá a la velocidad necesaria y tenderá a “caerse”.

Si la velocidad del avión no se corrigiera, el avión aterrizaría demasiado pronto en el caso de llevar una velocidad baja, y si volara a una velocidad demasiado alta no le daría tiempo a descender lo suficiente y aterrizaría pasado el punto correcto de toma de tierra. El objetivo que se ha propuesto es que el avión aterrice siempre donde debería, por lo tanto el sistema se ha programado para que a mitad del descenso valore la velocidad de vuelo y decida si disminuirla, en el caso de que sea alta, o aumentarla en el caso de que sea baja.

Al contrario que para la velocidad del avión, la velocidad del viento es el único factor simulado que puede provocar un aterrizaje fallido, en este caso la selección por parte del usuario es similar ya que, se indica si se quiere simular la acción del viento y para que sentido se quiere que sople: izquierda, derecha, arriba, abajo . Lo que provoca en el avión es una fuerza constante hacia el lado en que se haya elegido, el avión intentará corregir la dirección de forma normal, pero al haber una fuerza externa “empujándolo” hacia uno de los lados, la corrección no será la idónea y el avión sufrirá una desviación en la dirección en que se haya elegido. Este factor también puede ser un elemento a tener en cuenta en futuras mejoras de la simulación para poder simular unas condiciones atmosféricas lo más parecidas a la realidad, pudiendo elegir una fuerza del viento constante o a rachas o incluso estudiar el efecto de la lluvia en escenarios como el descrito.

5.6 Simulación Completa

Una vez han sido detallados los elementos del sistema así como de la forma en que han sido simulados, queda por explicar la forma en que el resultado final se presenta al usuario.

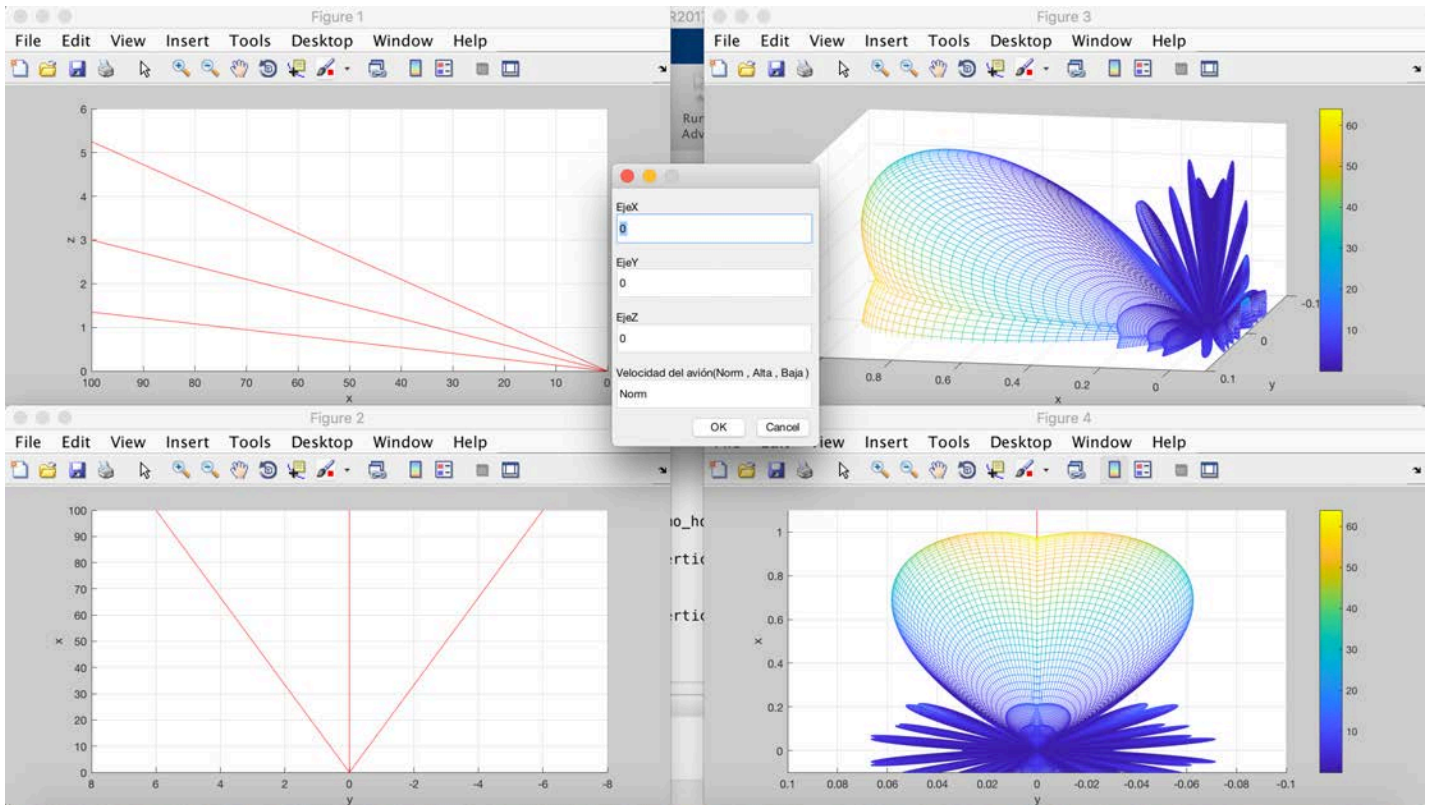


Figura 27: Pantalla de inicio de la simulación

En la figura 27 aparece la pantalla mostrada al inicio de la ejecución del programa, en el caso de que no se haya simulado la acción del viento¹⁹, en ella se pueden ver, a la izquierda, las dos gráficas para la ayuda del colocación inicial del avión, a la derecha los dos diagramas de radiación simulados y en el centro de la imagen aparece el menú para la configuración inicial del sistema. Las tres primeras filas son para el posicionamiento del avión pudiendo seleccionar cualquier punto dentro de los límites descritos por las líneas rojas, recomendándose elegir siempre el punto 100 en el eje X, para ver como el avión pasa por todas las balizas y así tener una mejor apreciación del funcionamiento de sistema completo. La última fila será para indicar la velocidad del avión.

Una vez elegidos los parámetros empieza la simulación como se puede observar en la figura 28. A medida que el avión avanza irá atravesando todas las zonas de las balizas, produciendo los tonos correspondientes y corrigiendo su posición, como se ha indicado anteriormente, hasta que termine aterrizando.

¹⁹ La simulación creada incluyendo el efecto del viento se detallará más adelante en el capítulo 6

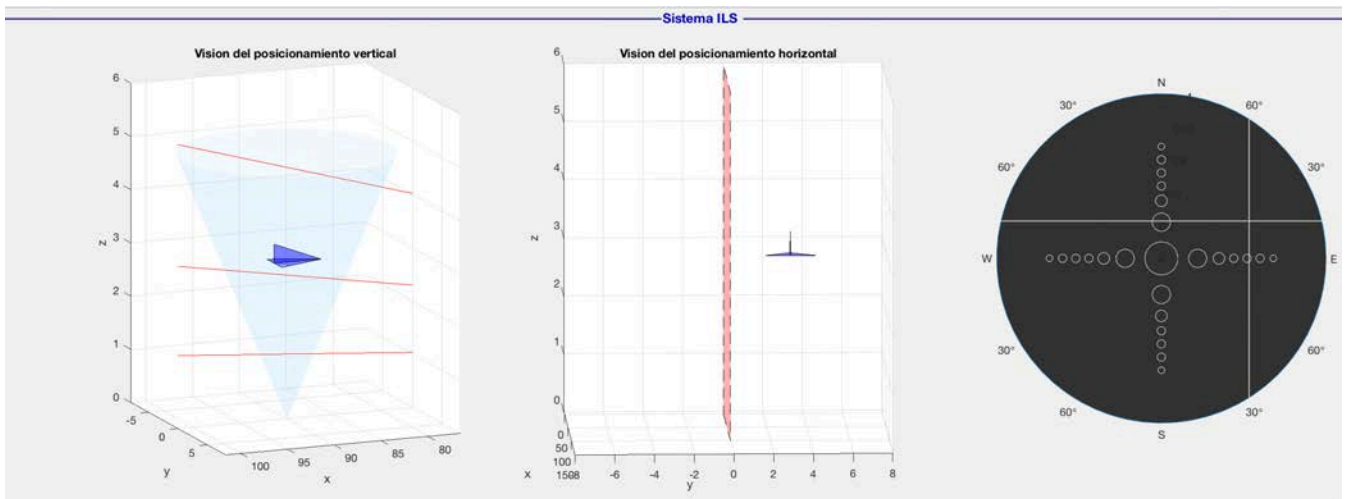


Figura 28: Pantalla de desarrollo de la simulación

En cuanto la simulación haya finalizado, esto es, cuando el avión se detiene, aparecerá en pantalla un gráfico (figura 29) el cual nos mostrará la ruta que ha seguido el avión. Esta información es de gran ayuda, ya que nos permitirá observar con mayor precisión todo el recorrido del avión así como las zonas donde ha cambiado el rumbo y el punto donde se ha alcanzado la trayectoria correcta. El recorrido seguido por el avión queda representado por la línea azul mientras que las líneas rojas son las líneas previamente definidas de correcto funcionamiento del sistema.

En este caso, para la simulación desarrollada, se puede observar en la figura 29 cómo el avión ha iniciado su aproximación arriba y a la derecha de la trayectoria idónea y cómo, a medida que ha ido avanzando, dicha posición ha sido corregida hasta alinearse, prácticamente por completo, con la ruta de descenso correcta. Una vez el avión “corta” con el punto de DDM igual a 0, solo le queda no desviarse de la trayectoria definida para poder aterrizar correctamente. Con la aparición de dicho gráfico podemos dar la simulación por concluida, pudiendo ejecutarla de nuevo con unas condiciones de viento, velocidad y posición diferentes, haciendo que el nuevo escenario sea completamente diferente al anterior.

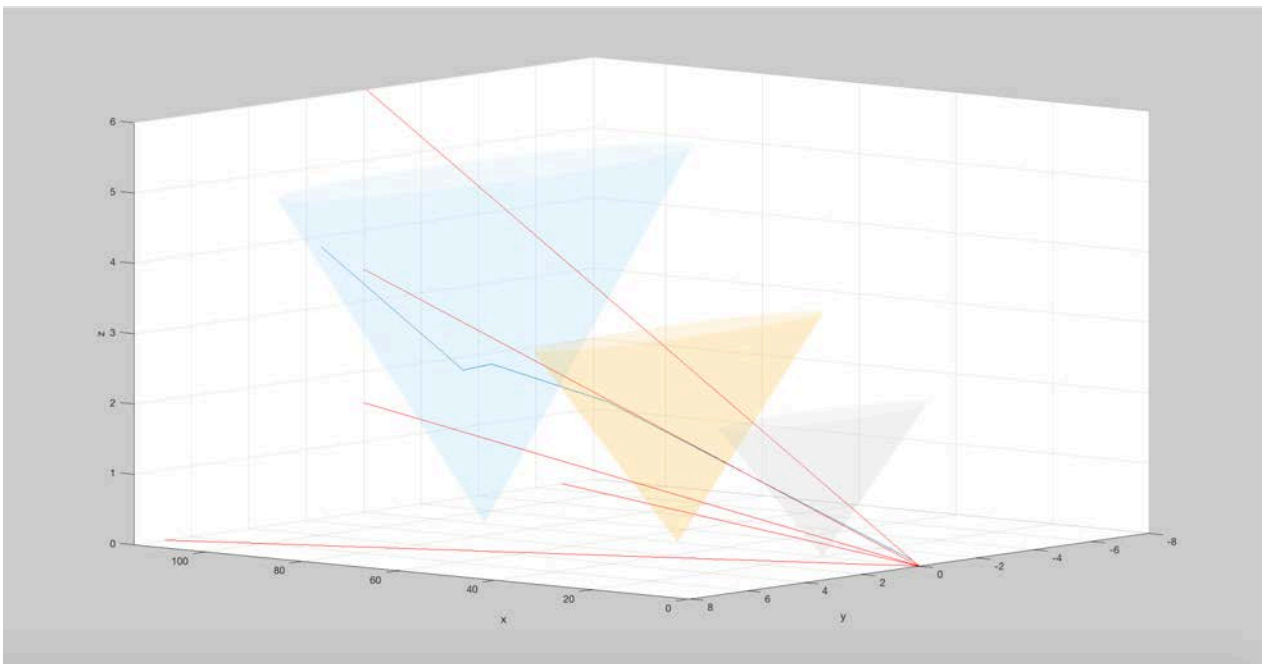


Figura 29: Pantalla resumen de la simulación

Capítulo 6.

Alternativas y futuras líneas de desarrollo

6.1 Elementos no simulados

En el presente apartado se describen los sistemas y factores que no se han tenido en cuenta a la hora de desarrollar la simulación, y que pueden resultar la línea de trabajo principal para futuras ampliaciones del sistema.

6.1.1 VOR

El VOR, very high omnidirectional range, es un sistema cuyo principal objetivo es el de proveer una herramienta para determinar el posicionamiento del avión respecto a una estación VOR de referencia en tierra; también es capaz de transmitir al avión una determinada trayectoria de aproximación o despegue de la pista.

La estación en tierra radia una señal *broadcast* en el espectro de VHF, que es recibida por las aeronaves dentro del alcance de dicha señal y que estén sintonizadas a la frecuencia apropiada. Dicha transmisión consta de 3 señales, dos de ellas están moduladas a 30 Hz (variando de fase entre sí) que son las encargadas de indicar la trayectoria al avión respecto a la antena transmisora, la tercera señal se encarga de transmitir en código Morse el código de reconocimiento de la estación emisora. [39]

6.1.2 Aproximación completa

Como hemos mencionado anteriormente, para una implementación más didáctica se ha simulado una aproximación para los últimos 100 metros del recorrido de descenso de la nave, que puede llegar a no ser precisa en términos de velocidad y distancias, debido a las proporciones del avión y de la pista. Por ello, para una posible aplicación comercial de la simulación, se requeriría el uso de distancias más realistas, así como de dimensiones del avión que puedan semejarse a un avión comercial.

6.1.3 Cambios meteorológicos

Para poder realizar simulaciones lo más ajustadas a la realidad, que puedan servir para estudiar cómo afectan diferentes fenómenos meteorológicos a la hora del aterrizaje. Sería de gran utilidad poder simular cualquier configuración atmosférica como por ejemplo lluvia, nieve o niebla.

6.1.4 Incluir cambios en función de la categoría del aterrizaje

Otra de las ventajas que se podría obtener de la implementación del punto 5.1.2, sería poder configurar cada aterrizaje para cada categoría del aeropuerto. En ese estudio, se tendrían en cuenta otros parámetros que no han sido analizados por ahora como la visibilidad o la altitud de decisión²⁰.

6.1.5 DME

El DME, distance measuring equipment, normalmente se implementa junto con el VOR y el ILS. De hecho, la estación de referencia se suele situar junto con la del VOR. La función principal de este es la de suministrar al avión la información de la distancia de la aeronave a la antena del *glide slope*. El funcionamiento del DME es relativamente sencillo, ya que se envía una señal broadcast entre 978 y 1213 MHz, seleccionada automáticamente al elegir la frecuencia del *localizer*; la estación en tierra la recibe y la retransmite pasados 50 microsegundos, posteriormente el equipo (en el avión) puede calcular la distancia simplemente midiendo el tiempo que ha tardado la señal en regresar restándole los 50 microsegundos. [40]

6.2 Mejoras

Una vez descritos los elementos que no han sido simulados, quedaría describir las posibles mejoras, de cara a obtener una aplicación que pueda simular cualquier escenario planteado.

6.2.1 Precisión en la velocidad del avión

Sería de gran utilidad contar con una simulación que tuviera en cuenta la velocidad real del avión, pudiendo trabajar con números que aporten una mayor precisión. En la realizada solo se han planteado 3 situaciones: velocidad superior, velocidad inferior y velocidad óptima.

²⁰ Explicado en el punto 3.1

6.2.2 Precisión en la velocidad del viento

Este apartado está directamente relacionado con el punto 5.1.2 ya que forma parte de la simulación con mayor precisión de las condiciones climatológicas. En este caso, debido a que la simulación del viento no era uno de los objetivos principales del proyecto, la capacidad de configuración de este último es relativamente corta, pudiendo elegir únicamente 4 direcciones del viento. Por tanto este es un apartado donde se podría trabajar ampliamente para futuras ampliaciones del proyecto, logrando simular situaciones lo más parecidas a la realidad posibles.

Capítulo 7.

Pruebas y evaluación de resultados

7.1 Pruebas

Para comprobar la fiabilidad y robustez del código programado se han realizado diferentes pruebas, teniendo en cuenta que el objetivo final de la simulación era intentar que el avión siempre completara un aterrizaje satisfactorio, sin importar sus condiciones iniciales²¹.

Para poder afirmar que la simulación es correcta se han realizado 4 pruebas diferentes, observando en cada caso que las radiobalizas emitían el sonido adecuado cuando el avión sobrevolaba por encima de ellas, y que el avión aterrizaba correctamente sin importar la velocidad inicial escogida. Las pruebas han consistido en simular 4 escenarios diferentes, más uno especial para el caso del uso de la simulación del viento. Consistían en posicionar el avión en cuatro planos diferentes: arriba y a la derecha de la trayectoria correcta; arriba y a la izquierda; abajo y a la derecha, y abajo y a la izquierda. Haciendo, para caso, las pruebas correspondientes, que se han mencionado anteriormente. Para llevar a cabo la simulación en los cuatro escenarios se ha elegido un punto diferente en el eje Y y Z manteniendo siempre el punto X igual a 100 para ver cómo se comporta el avión en todo su recorrido.

Para el caso de las pruebas incluyendo el efecto del viento, con el objetivo de no alargar demasiado la memoria, han sido simuladas y evaluadas las cuatro posibles opciones de configuración del viento cuando el avión se sitúa arriba y a la derecha.

7.1.1 Posicionamiento arriba y a la derecha

Como se ha comentado, posicionamos el avión arriba, a la derecha de la trayectoria normal, concretamente en los puntos $X = 100$ m, $Y = 4$ m, $Z = 4$ m, obteniendo un resultado como el de la figura 30, siendo un aterrizaje satisfactorio y consiguiendo una simulación correcta. Podemos observar claramente que el avión en un primer momento ha descendido, para corregir el exceso de altura, y ha girado a la izquierda, para ajustar

²¹ Dicha afirmación aplica para cualquier configuración inicial que no incluya la simulación de viento ya que, como hemos mencionado anteriormente este si que es un factor que altera el correcto desarrollo del aterrizaje

su posicionamiento horizontal, y cuando el algoritmo ha detectado el punto de DDM igual a 0 ha continuado con la trayectoria correcta de descenso hasta tomar tierra en el punto deseado.

Como nota aclaratoria, cabe destacar que, la trayectoria que suele describir el avión nunca es perfecta en el sentido de que, cuando inicia su maniobra de descenso no se detiene justo en la línea central, sino que sigue descendiendo, hasta que el algoritmo le informa que esta debajo de la trayectoria adecuada y es cuando vuelve a ascender y toma una posición correcta para iniciar un descenso continuado.

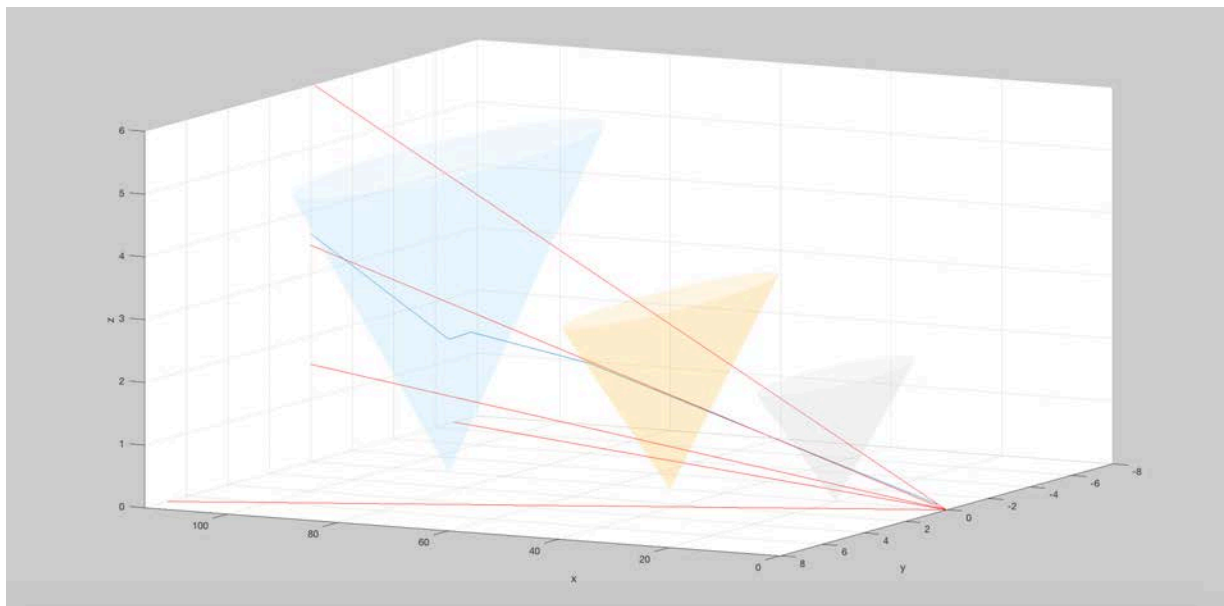


Figura 30: Prueba número 1, avión arriba a la derecha y velocidad normal

7.1.1.1 Posicionamiento arriba y a la derecha con diferentes velocidades

A continuación se ha realizado la misma prueba que para el punto 6.1.1 pero con distintas velocidades, superior e inferior, obteniendo las siguientes gráficas:

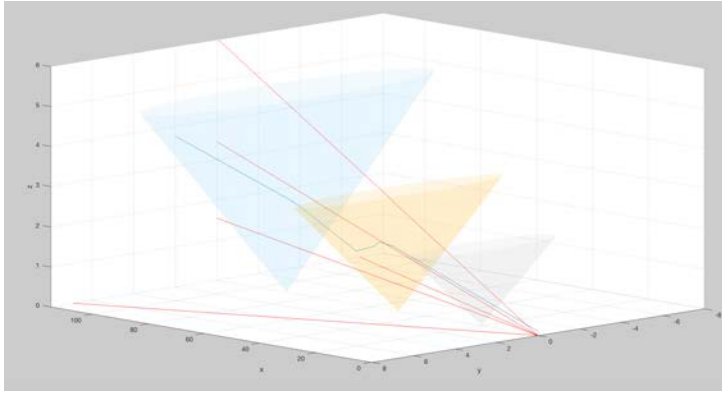


Figura 31: Arriba y a la derecha, velocidad alta

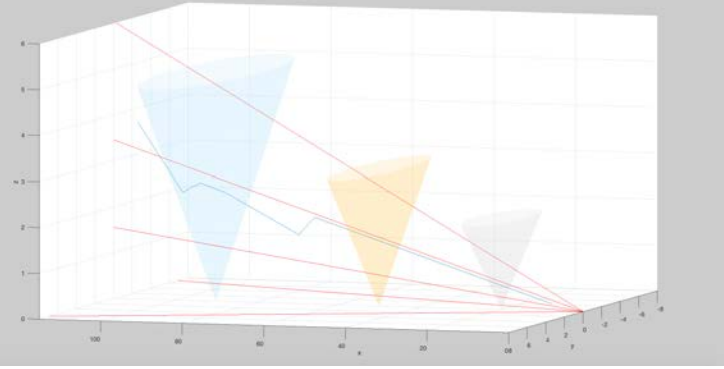


Figura 32: Arriba y a la izquierda, velocidad lenta

En la figura 31 podemos observar que el avión, al llevar una velocidad demasiado alta no desciende lo suficiente, como si lo hace en la figura 30, hasta que corrige su velocidad y procede a un descenso normal. En la figura 32 sin embargo el avión tiende a caerse ya que lleva una velocidad inferior a la que debería, hasta que el algoritmo reconoce la velocidad y la corrige produciéndose en los dos casos un aterrizaje satisfactorio.

7.1.2 Posicionamiento arriba y a la izquierda

En este caso el punto elegido es el $X = 100$ m, $Y = -4$ m, $Z = 4$ m obteniendo el resultado de la figura 33.

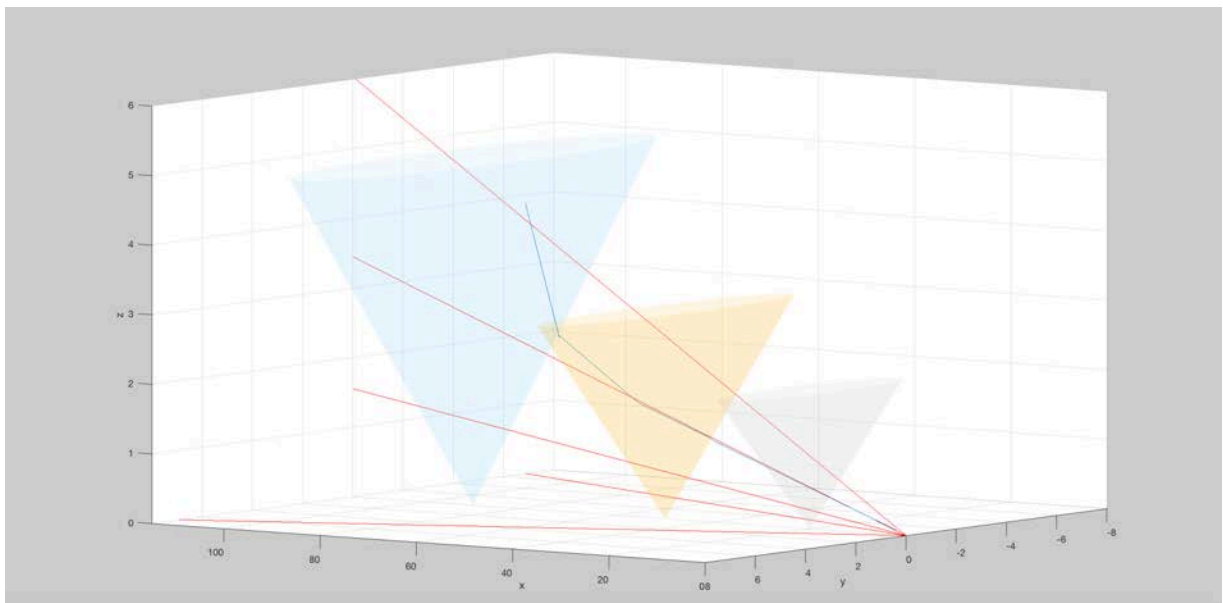


Figura 33: Prueba número 2, avión arriba a la izquierda y velocidad normal

El avión se comporta relativamente parecido al punto 6.1.1. Evalúa el nivel de potencia recibido del *localizer* y del *glide slope*, decidiendo que, para alinearse con la trayectoria correcta debía girar a la derecha y descender, pudiendo dar la simulación como correcta.

7.1.2.1 Posicionamiento arriba y a la izquierda con diferentes velocidades

Quizá en este caso se puede observar más claramente la diferencia que hay a la hora de cambiar las velocidades, ya que se puede ver como cuando vuela a una velocidad alta, el avión desciende mucho mas tarde; mientras que, para el caso de la velocidad baja el avión tiende a caerle hasta que corrige su posición. En ambos casos se puede observar una ligera desviación al final del recorrido, fruto de una corrección no del todo precisa, de la velocidad en el plano horizontal.

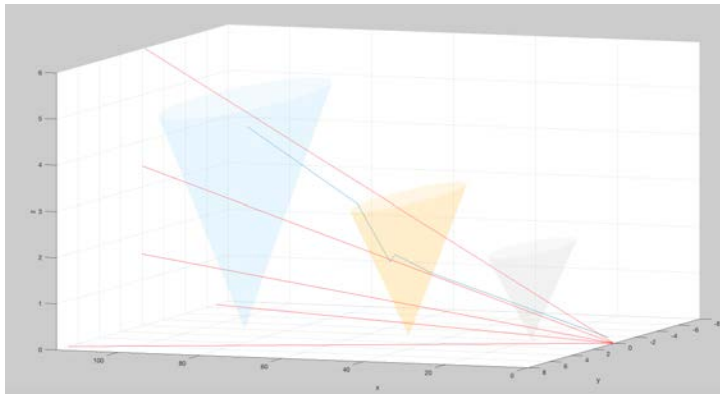


Figura 34: Arriba y a la izquierda, velocidad alta

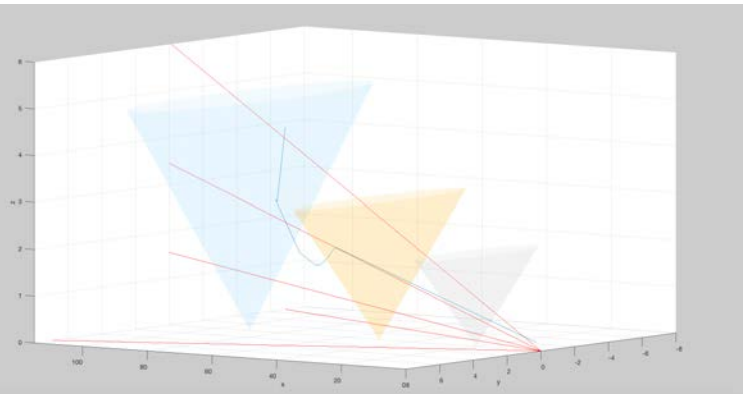


Figura 35: Arriba y a la izquierda, velocidad lenta

7.1.3 Posicionamiento abajo y a la derecha

Para la presente prueba se ha seleccionado el punto $X = 100$ m, $Y = 4$ m, $Z = 1$ mdando como resultado el posicionamiento requerido y simulándose de la forma que aparece en la figura 36.

Para los posicionamientos del avión por debajo de la línea correcta de descenso, siempre se ha tenido un nivel de error algo mayor, que puede ser debido a que los cálculos se generan para ángulos menores, dando lugar a pequeñas desviaciones en la trayectoria. Además, el uso de un diagrama de radiación muy cercano al suelo, lo que hace más complicado el ajuste de dicho patrón.

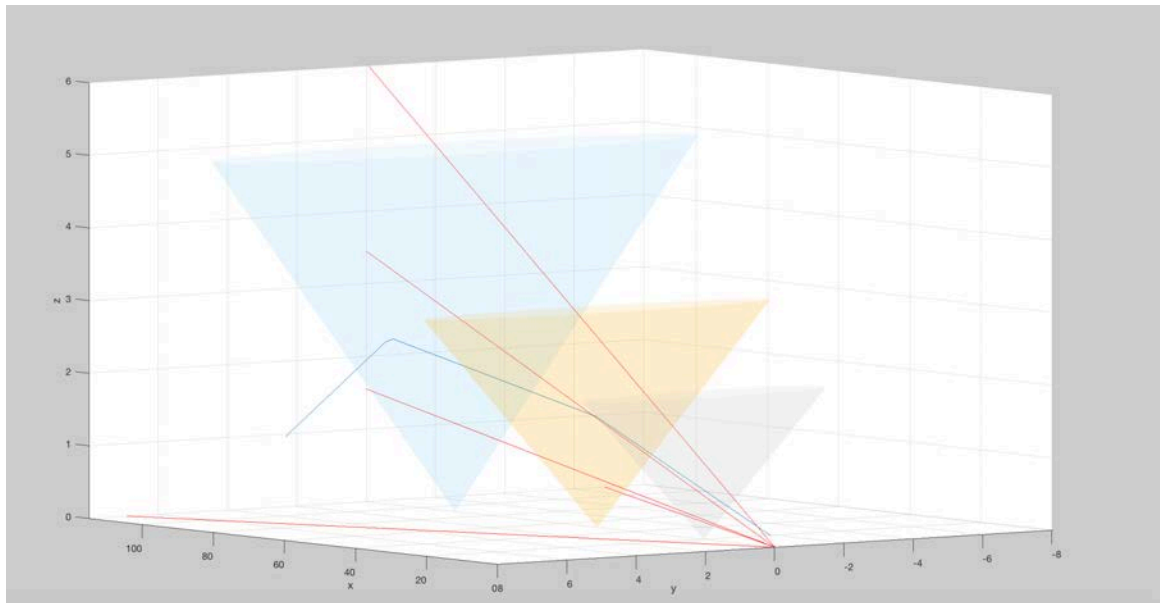


Figura 36: Prueba número 3, avión abajo a la derecha y velocidad normal

7.1.3.1 Posicionamiento abajo y a la derecha con diferentes velocidades

En estos caso, como hemos comentado, observamos un desarrollo de trayectorias ligeramente más imprecisas, que para el caso de posicionar el avión por encima de la trayectoria correcta; por lo tanto esto es aplicable también al escenario que se describe en esta prueba ya que lo único que cambia respecto a la anterior es la velocidad del avión. Los resultados se observan en las siguientes figuras 37 y 38.

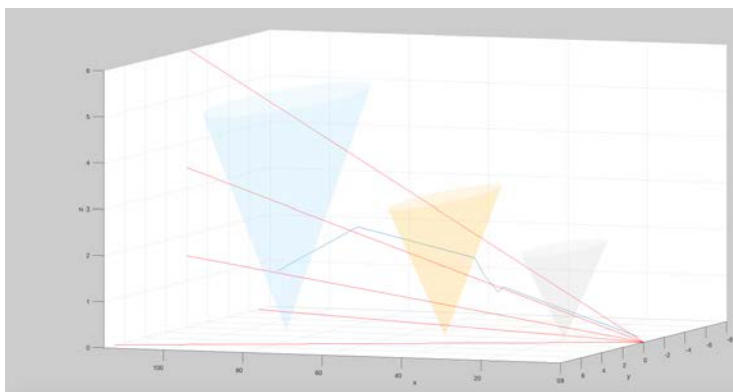


Figura 37: Abajo y a la derecha, velocidad alta

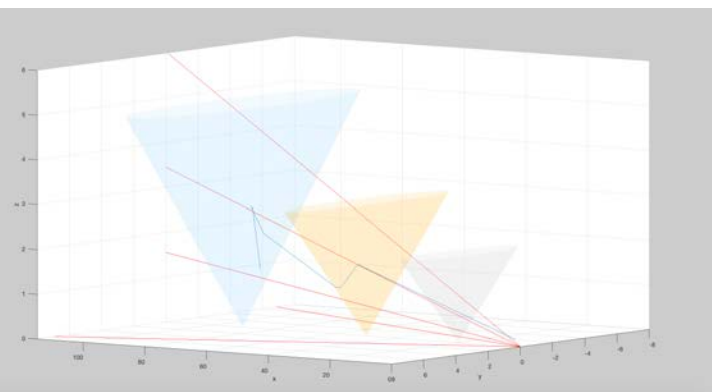


Figura 38: Abajo y a la derecha, velocidad lenta

7.1.4 Posicionamiento abajo y a la izquierda

Finalmente realizamos la prueba para el punto $X = 100$ m, $Y = -4$ m, $Z = 1$ m obteniendo mejores resultados que para la anterior, como se puede observar en la figura 39, obteniéndose también un aterrizaje prácticamente perfecto.

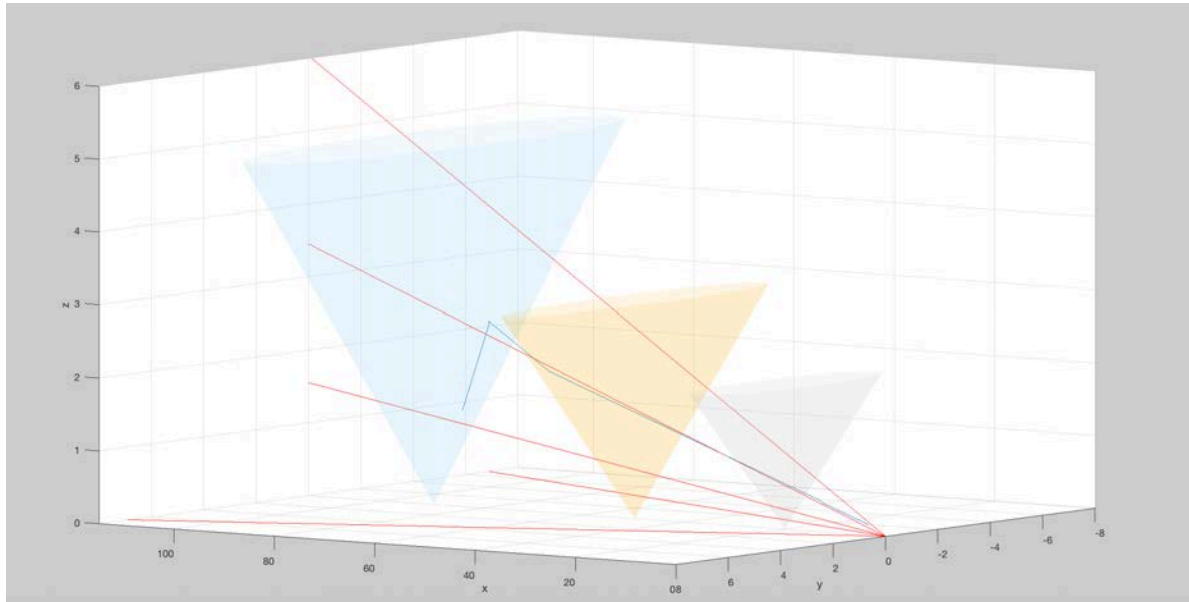


Figura 39: Prueba número 4, avión abajo a la izquierda y velocidad normal

7.1.4.1 Posicionamiento abajo y a la izquierda con diferentes velocidades

Para el último caso de cambio de velocidades observamos un comportamiento similar al resto de simulaciones concluyendo que para este caso el aterrizaje es también satisfactorios

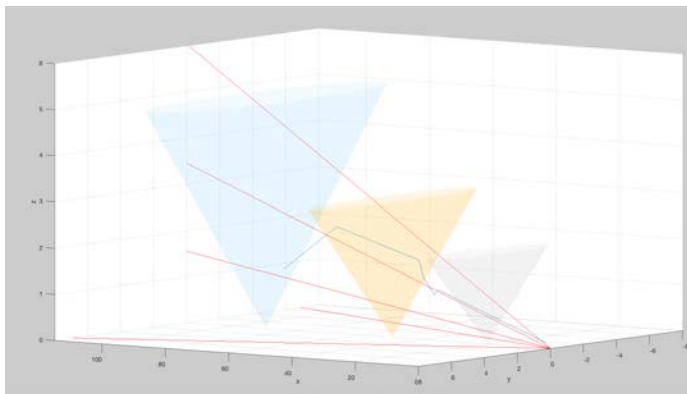


Figura 40: Abajo y a la izquierda, velocidad alta

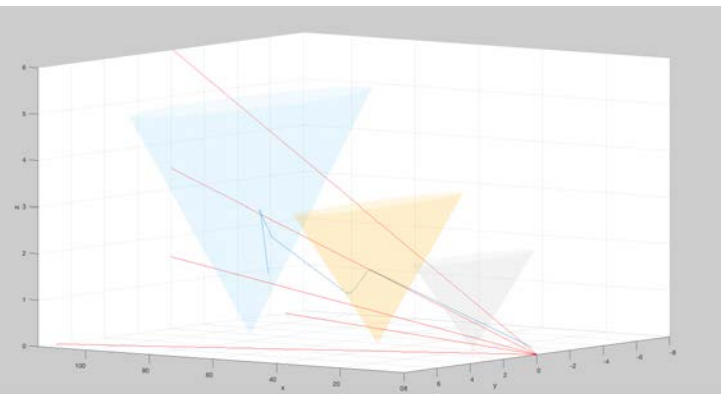
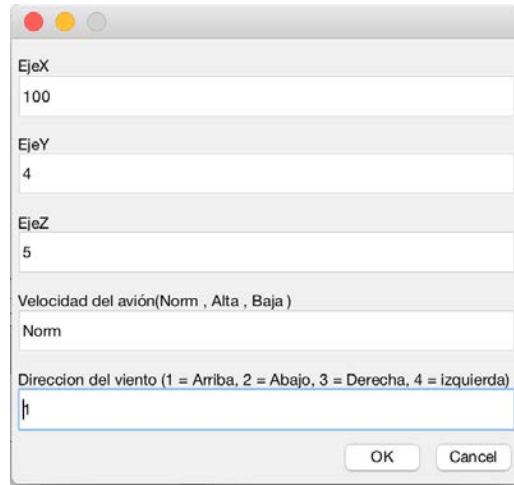


Figura 41: Abajo y a la izquierda, velocidad lenta

7.1.5 Prueba simulando viento

En este caso al inicio de la simulación introduciremos la opción “Si” en el cuadro de diálogo y nos parecerá una ventana de configuración como la de la figura 42:



The image shows a standard macOS-style dialog box with a title bar containing three colored buttons (red, yellow, grey). The dialog contains several input fields and a list box. The fields are labeled 'EjeX', 'EjeY', 'EjeZ', 'Velocidad del avión(Norm , Alta , Baja)', and 'Direccion del viento (1 = Arriba, 2 = Abajo, 3 = Derecha, 4 = izquierda)'. The values entered are 100, 4, 5, Norm, and 1 respectively. At the bottom right are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Parameter	Value
EjeX	100
EjeY	4
EjeZ	5
Velocidad del avión(Norm , Alta , Baja)	Norm
Direccion del viento (1 = Arriba, 2 = Abajo, 3 = Derecha, 4 = izquierda)	1

Figura 42: Configuración parámetros y velocidad de viento

Los 4 parámetros son igual que para los puntos anteriores, sin embargo, ahora aparece una línea más, que nos da la opción de indicar la dirección del viento pudiendo elegir; 1 para una dirección ascendente, 2 para la descendente, 3 hacia la derecha y 4 hacia la izquierda.

El efecto que producirá en el avión será una fuerza en la dirección indicada, lo que conllevará una desviación en su trayectoria correcta.

Con el objetivo de simular diferentes condiciones, en el caso de elegir la opción 3, (viento soplando hacia la derecha del avión) se ha tratado de simular lo que producirían “rachas” de viento en el descenso del avión.

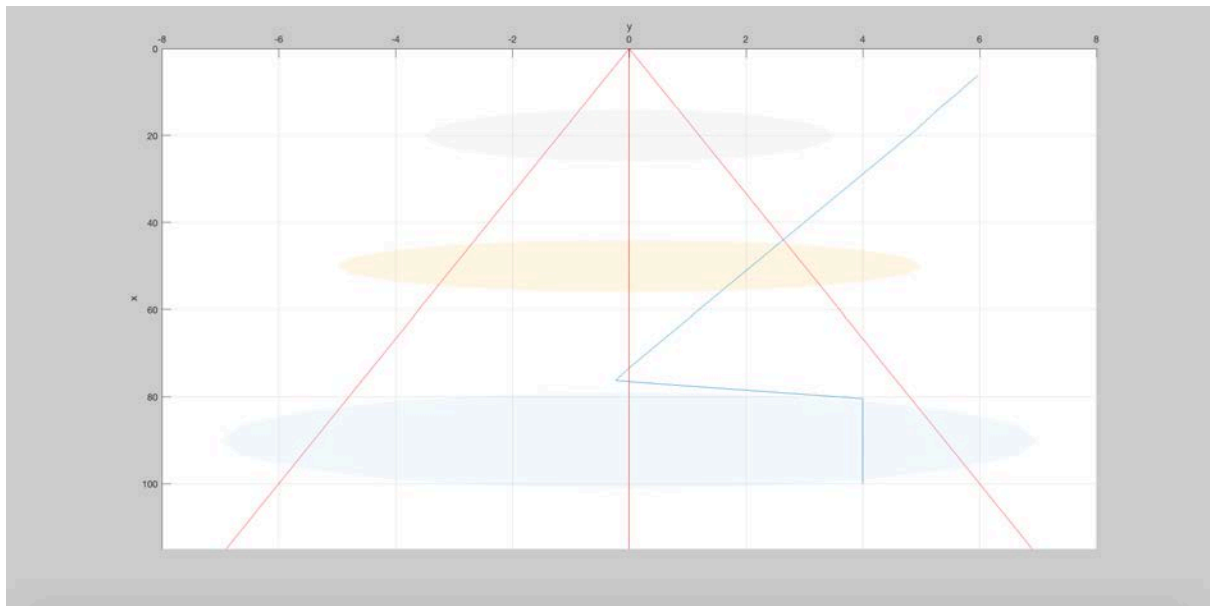


Figura 43 Avión situado arriba a la derecha con racha de viento hacia la derecha

Para lograr una mayor claridad en las explicaciones, la figura 43 es una vista de la trayectoria descrita por el avión desde arriba. Se puede ver como al inicio del recorrido, pese a que el avión quería corregir su posición girando a la izquierda, la fuerza del viento era igual a la fuerza generada por el avión resultando un desplazamiento nulo en el plano horizontal. Posteriormente sobrevuela una zona con velocidad de viento nula o quizá ligeramente hacia el lado opuesto lo que genera una corrección muy rápida de la dirección. A partir de ahí el viento empieza a soplar de forma constante, superando la fuerza de giro del avión produciendo una desviación en el tramo final del vuelo.

En el caso de que se elija la opción 4, el viento soplará hacia la izquierda. A diferencia de la situación anterior, se ha generado una fuerza constante del viento por lo que el resultado será una desviación prácticamente constante en el recorrido del avión.

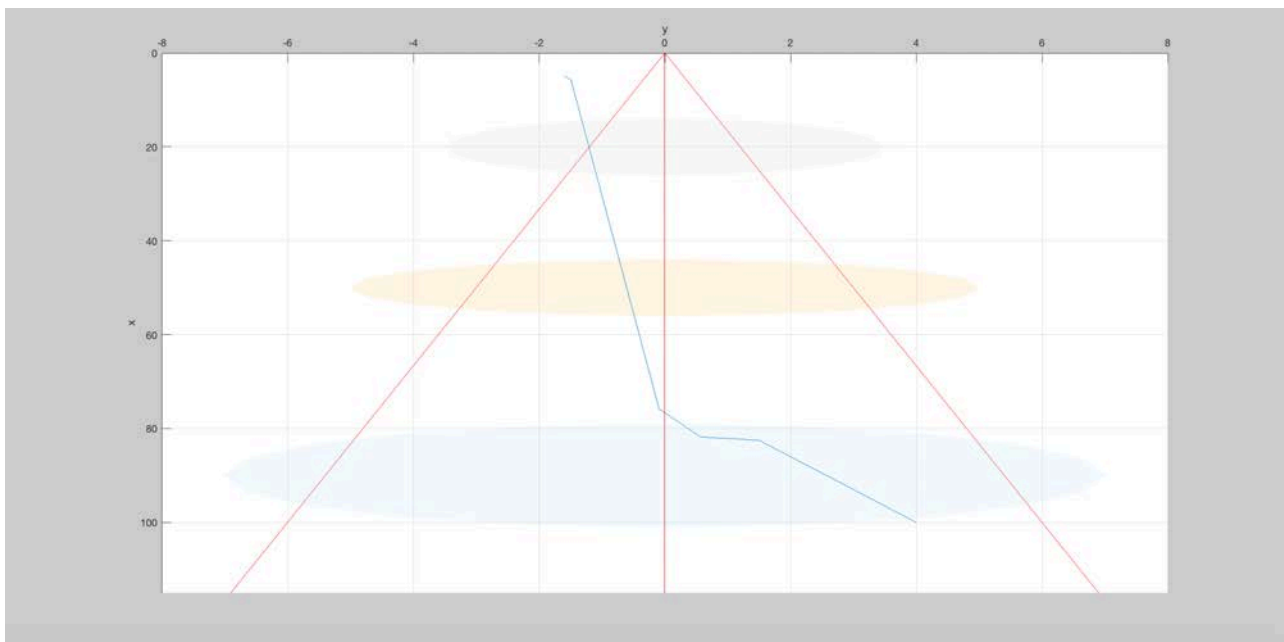


Figura 44 Avión situado arriba a la derecha con racha de viento hacia la izquierda

Finalmente, para las opciones 1 y 2 los resultados obtenidos son similares. Se producirá un aterrizaje prematuro, en caso de elegir un viento descendente, ya que habrá una fuerza que empuje el avión hacia abajo. En el caso de elegir la opción 1, el avión no descenderá lo suficiente, ya que se simulara un viento en sentido ascendente, lo que producirá que el avión se encontrara por encima de la altura adecuada en el punto de toma de tierra. Dichas simulaciones pueden observarse con mayor claridad en la figura 45 y 46:

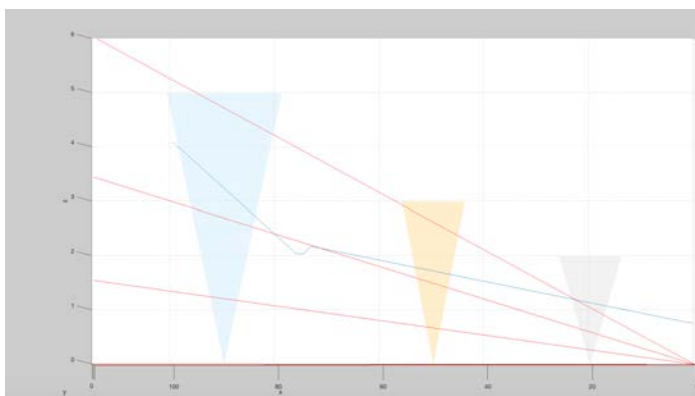


Figura 45 Simulación viento ascendente

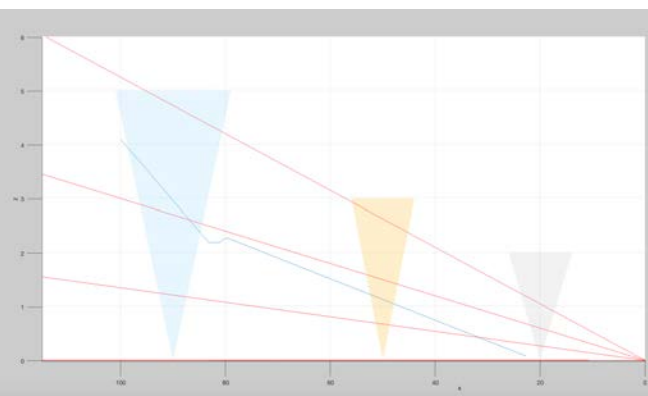


Figura 46 Simulación viento descendente

En las dos figuras anteriores podemos ver claramente como el avión “corta” la línea central antes si se simula viento descendente, debido a que, como hemos explicado

anteriormente, el viento en este caso empuja al avión hacia abajo lo que hace que, a velocidades iguales, el avión descienda más rápidamente.

7.2 Evaluación de los resultados

Los resultados han sido evaluados, principalmente, atendiendo a las pruebas previamente mencionadas; no obstante, para conseguir una mayor precisión de los resultados, se ha ejecutado el algoritmo con diversas posiciones iniciales del avión, obteniendo para todas ellas resultados similares.

Podemos concluir que: para cualquier situación en la que el avión se coloque por encima de la trayectoria correcta de descenso, el aterrizaje se desarrolla de forma satisfactoria, aterrizando justo en el punto deseado; sin embargo, cuando el avión se sitúa por debajo, podemos observar una pequeña desviación en la parte final del trayecto, que hace que el avión no aterrice a la perfección sino con unos centímetros de desviación a la derecha. Pese a este último detalle, el objetivo de que el avión siempre aterrice correctamente, ajustando sus condiciones iniciales, se cumple. Pudiendo concluir que la evaluación de los resultados ha sido satisfactoria.

Capítulo 8.

Planificación y Presupuesto

8.1 Planificación

Plantear una planificación inicial del proyecto es un factor crucial para poder concluir el mismo satisfactoriamente, llegando a cubrir todos los objetivos que se comentaron al principio de la presente memoria. Para ello hay que tener en cuenta los días disponibles y las tareas requeridas para afrontar el trabajo con garantías.

El proyecto se inició a fecha 21 de junio de 2017 finalizándose el 9 de febrero de 2018 lo que suponen 168 días, sin contar fines de semana ni festivos.

El desarrollo del presente TFG ha tenido diferentes etapas claramente diferenciadas ya que, por ejemplo, hasta que la simulación no había quedado prácticamente concluida no se ha procedido a redactar la memoria. Seguidamente se detallaran las diferentes fases que ha tenido el proyecto.

1. **Comprensión de la base teórica:** Para poder empezar a programar el código de la simulación, fue necesario comprender y estudiar cada elemento del sistema, así como ampliar y revisar los conocimientos de la programación en Matlab.

- 1.1. Comunicaciones inalámbricas, antenas, diagramas de radiación y modulaciones.
- 1.2. Componentes del ILS.
- 1.3. Herramienta de simulación.
- 1.4. Funciones requeridas en la simulación.

2. **Desarrollo del sistema:** Una vez ya se tenía pleno conocimiento teórico sobre el ILS, así como de la forma en la que había que afrontar el problema, se pasó a programar el sistema.

- 2.1. Implementación de las antenas transmisoras.
- 2.2. Implementación sistemas receptores.
- 2.3. Implementación del movimiento del avión.
- 2.4. Desarrollo de la interfaz gráfica.
- 2.5. Implementación de los *marker beacons*.
- 2.6. Implementación de los factores externos, velocidad del viento y del avión.

3. **Validación del sistema:** Finalizada la programación del simulador, se comprobó que los sistemas funcionaban como debían. Realizando las pruebas detalladas en el

capítulo 6. Pese a que la validación se detalle como una fase diferente al desarrollo, a medida que se iba desarrollando el código, se iban ejecutando continuas validaciones para asegurar que se estaban siguiendo los pasos correctos.

- 3.1. Pruebas en los sistemas transmisores y receptores.
- 3.2. Pruebas de vuelo en condiciones normales.
- 3.3. Pruebas de vuelo con diferentes condiciones en las velocidades
- 3.4. Evaluación y cambios finales.
4. **Memoria:** Finalmente, para acabar el TFG se continuó con la redacción de la memoria.
 - 4.1. Estructuración inicial.
 - 4.2. Escritura.
 - 4.3. Revisión y cambios finales.

Los cálculos se han obtenido basándose en jornadas de trabajo de 4 horas diarias de media, lo que supone un total de $168 \times 4 = 672$ horas.

A continuación, en la tabla 4, se detallaran los requerimientos de tiempo y relación de cada una de las tareas.

Fase	Dependencia con otras tareas	Cantidad de jornadas	Horas
1. Comprensión de la base teórica.		35	140
1.1. Comunicaciones inalámbricas.		10	40
1.2. Componentes del ILS.	1.1	12	48
1.3. Herramienta de simulación.		6	24
1.4. Funciones requeridas en la simulación.	1.1, 1.2, 1.3	7	28
2. Desarrollo del sistema.		48	192
2.1. Implementación de antenas transmisoras.	1.1, 1.2, 1.3, 1.4	12	48
2.2. Implementación sistemas receptores.	2.1	10	40
2.3. Implementación del movimiento del avión.	2.1, 2.2	8	32
2.4. Desarrollo de la interfaz gráfica.	2.3	5	20

Fase	Dependencia con otras tareas	Cantidad de jornadas	Horas
2.5. Implementación de los <i>marker beacons</i> .	2.4	1	4
2.6. Implementación de los factores externos.	2.4	12	48
3. Validación del sistema.		29	116
3.1. Prueba en los sistemas transmisores y receptores.	2.1, 2.2, 2.6	9	36
3.2. Prueba de vuelo en condiciones normales.	2.3, 3.1	6	24
3.3. Prueba de vuelo con diferentes condiciones en las velocidades.	2.4, 3.2	6	24
3.4. Evaluación y cambios finales.	3.1, 3.2, 3.3	8	32
4. Memoria.		56	224
4.1. Estructuración inicial.		5	20
4.2. Escritura.	1.4, 3.4	40	160
4.3. Revisión y cambios finales.	4.2	11	44
Total		168	672

Tabla 4 Detalles de la planificación y del desarrollo del proyecto

Una vez hemos desglosado cada tarea desarrollada en el proyecto, así como su relación con tareas anteriores, se adjuntará un diagrama de Gantt para visualizar dicha información de una forma más esquemática.

El desarrollo del trabajo ha sido bastante lineal, es decir, hasta que no se acababa una tarea no se empezaba la siguiente, por lo tanto el camino crítico, también lo será. Aparecerá de un color más oscuro y rayados.

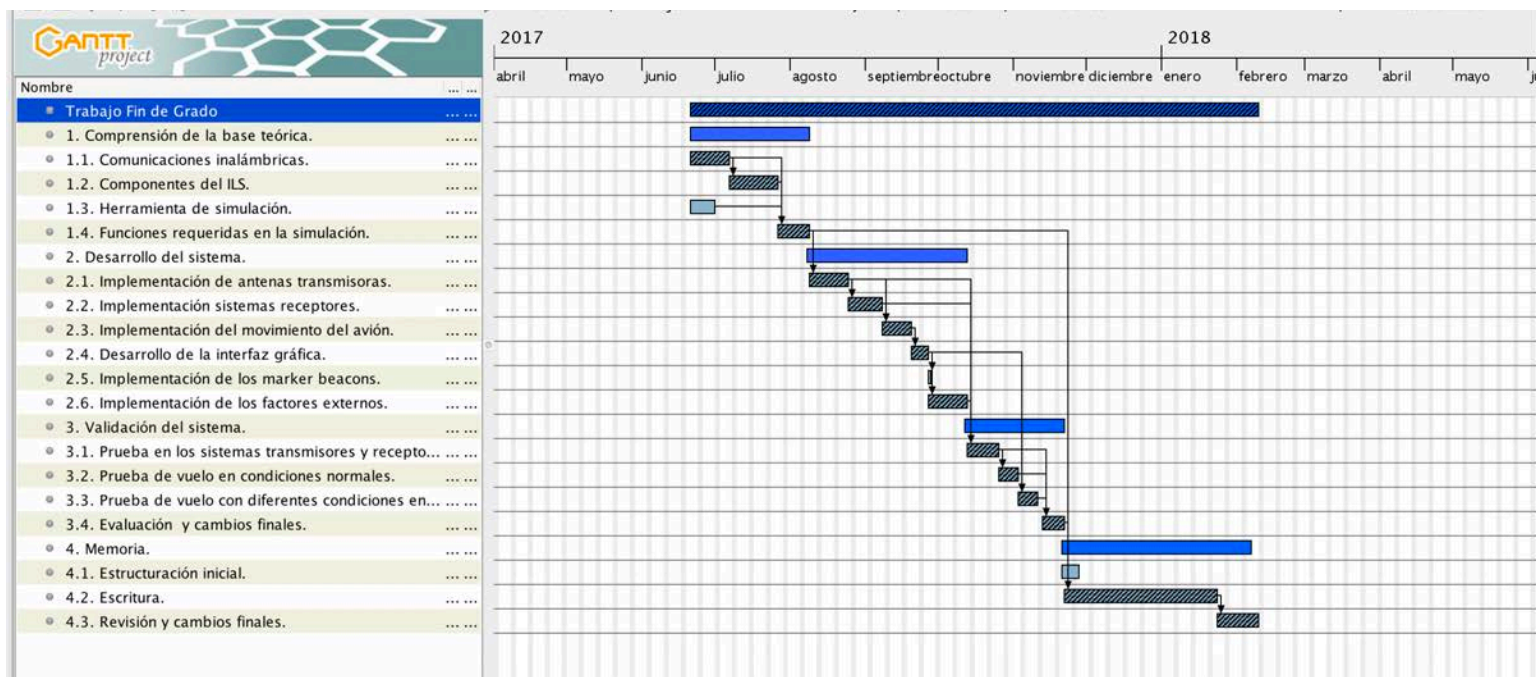


Figura 47: Diagrama de Gant

8.2 Presupuesto

Para llevar a cabo el cálculo del presupuesto necesario para la consecución del proyecto, se tomarán en cuenta los gastos de personal, así como los gastos del material necesario.

8.2.1 Costes de personal

Como se ha mencionado en el apartado anterior, 7.1, se han necesitado 168 días con un trabajo de 4 horas al día de media, eso hace un total de 672 horas de trabajo por parte del alumno y, aproximadamente, 60 horas de trabajo del tutor. Los costes por hora de trabajo se detallan en la tabla 5.

Personal	Tiempo de trabajo (Horas)	Coste por hora (€/h)	Coste total (€)
Tutor del proyecto	60	80	4.800
Alumno Graduado	672	40	26.880
Total			31.680

Tabla 5 Costes de personal

Por lo tanto podemos concluir que el coste en personal del proyecto será de 31.680 €.

8.2.2 Costes materiales

Por otra parte los materiales que se han necesitado han sido, 1 ordenador portátil y 1 licencia de la herramienta de desarrollo Matlab.

Para ser más precisos en nuestros cálculos se tendrá en cuenta el coeficiente de amortización ²², que según las tablas aportadas por la Agencia Tributaria será del 25% [41]. Calculando el coste de la siguiente forma:

$$coste = C.amortizacion * \frac{Num.Meses}{12} * Coste.Material$$

Por otra parte los materiales que se han necesitado han sido, 1 ordenador portátil y 1 licencia de la herramienta de desarrollo Matlab. En la tabla 6 se detallará el coste de cada material.

Material	Precio por material (€)	Meses utilizado	Coeficiente de amortización [42]	Coste (€)
Ordenador Portátil	1.400	5.5	25 %	160.41
Licencia Matlab [43]	2.000	5.5	25 %	229.16
Total				389,57

Tabla 6 Coste de material

El coste material es relativamente bajo ya que la totalidad del proyecto ha sido realizado desde el laboratorio utilizando un único ordenador.

8.2.3 Coste total

²² “Cuota que se ha de aplicar sobre el coste de adquisición de cada bien del inmovilizado o gasto amortizable para calcular el coste de amortización del ejercicio. La proporción se expresa en tanto por ciento anual, en el que se estima la depreciación de un activo por diversos motivos, como desgaste, uso u obsolescencia.” [44]

Finalmente, habiendo calculado ya los gastos en personal y los gastos materiales nos queda calcular los costes indirectos. Dichos costes incluyen gastos que son difícilmente calculables de forma precisa como son, el gasto de la línea de internet, transportes o electricidad. Para calcularlos se tomará un 20% de los costes totales. En la tabla 7 calcularemos los costes totales del proyecto sin contar los costes indirectos

Costes directos (€)	Coste (€)
Costes de personal	31.680
Costes materiales	389,57
Total costes directos	32069,57

Tabla 7 Costes directos

En la tabla 8, calcularemos el coste total del presupuesto teniendo en cuenta los costes indirectos como se ha indicado anteriormente.

Coste total (€)	Coste (€)
Coste directo	32.069,67
Coste indirecto	6.413,934
Total coste	38.483,604

Tabla 8 Costes totales

Por último, para calcular el total del presupuesto, quedará añadir al coste total el 21 % de IVA, quedando un presupuesto como el indicado en la tabla 9.

Presupuesto	Coste (€)
Total coste	38.483,604
IVA	7.696,7208
Total presupuesto del proyecto	46.180,3248

Capítulo 9.

Conclusiones finales

9.1 Conclusiones finales

En la realización del presente trabajo fin de grado, he tratado temas de modulación y tratamiento de señales, emisión y recepción de ondas de radio, programan en Matlab y modelaje de antenas. También he obtenido gran conocimiento en métodos de aproximación, aterrizaje y sistemas de radionavegación. Todo ello, me ha ayudado enormemente a ampliar mis conocimientos estas áreas, en las que estoy muy interesado. También ha sido útil para aclarar mis dudas sobre el ámbito de las Telecomunicaciones en el que quiero seguir aprendiendo e investigando.

Los primeros progresos de la simulación fueron quizás los más duros y difíciles ya que, la base teórica de un ILS no es demasiado compleja pero su implementación y simulación resultó serlo algo más. Como se ha indicado en el capítulo 7, la configuración de los sistemas transmisores fue lo primero en simular y lo más costoso, a partir de ahí, gracias a una fluida comunicación con el tutor y a un gran desempeño personal, todos los pasos que se dieron fueron más sencillos.

Centrándome en el proceso de realización de la simulación, desde el principio quise hacer un trabajo muy gráfico y comprensible, que sirviera tanto para imitar determinadas situaciones reales de vuelo, como para explicar el funcionamiento de un sistema ILS a cualquier interesado en dicha tecnología. Esto objetivos los he conseguido, ya que, no solo he diseñado el sistema cumpliendo los requerimientos técnicos y teóricos, sino que también la interfaz gráfica que he diseñado sirve de gran ayuda para observar cada decisión que el piloto debe tomar en los diferentes momentos del vuelo y del aterrizaje

Pese a ligeras desviaciones en la trayectoria final del descenso (para algunas situaciones mencionadas en el capítulo 6) el avión aterriza correctamente en cualquier configuración inicial de vuelo. Este era un requerimiento propuesto por el tutor desde el inicio del proyecto y lo ha conseguido satisfactoriamente.

Con el nivel de desarrollo actual de la aplicación, la funcionalidad de la simulación principal es la pedagógica, ya que sería de gran ayuda para ejemplificar

conceptos de teoría de la señal, campos electromagnéticos y tratamiento de señales, haciendo más sencilla su comprensión.

Es cierto también, que el presente trabajo fin de grado tiene grandes posibilidades de ampliación y desarrollo futuro, lo que llevaría a obtener una aplicación final capaz de simular cualquier situación de vuelo. Pudiendo prever distorsiones en los sistemas, ya sea por: interferencias con otros aviones, con la radio FM, con construcciones del aeropuerto o con accidentes geográficos, lo que conllevaría un gran ahorro en los costes de configuración de los sistemas, así como una oportunidad excelente de evaluar cómo se comporta el sistema ILS bajo determinadas circunstancias, sin tener que llevar a cabo un vuelo real.

Bibliografía

- [1] https://www.centennialofflight.net/essay/Government_Role/landing_nav/POL14.htm [Online]. Último acceso enero 2018
- [2] *European guidance material on integrity demonstration in support of certification ILS and MLS systems*, First Edition, 2004
- [3] IATA. Comunicado N°: 05 - <https://www.iata.org/pressroom/pr/Documents/2017-02-02-01-spanish.pdf> [Online]. Último acceso enero 2018
- [4] I Terminology and technical characteristics, Section IV. Radio Stations and Systems". *ITU Radio Regulations* (PDF). Geneva: International Telecommunication Union. 2012. p. 13. ISBN 978-92-61-14021-2.
- [5] Myron Kayton; Walter R. Fried. *Avionics Navigation Systems, 2nd Edition*
- [6] <http://www.renishaw.es/es/explicacion-de-la-interferometria--7854>. [online]. Último acceso Febrero 2018.
- [7] <https://es.wikipedia.org/wiki/Tel%C3%A9metro>. [online]. Último acceso Febrero 2018.
- [8] The Journal of the Acoustical Society of America 127, 1912 (2010)
- [9] Appleby, Thomas; *Mahlon Loomis, Inventor of Radio*.
- [10] "[Captain Henry Jackson's Radio Experiments](#)". Saltash & District Amateur Radio Club. Retrieved 1 December 2012. [Online]. Último acceso Febrero 2018.
- [11] *The Beginnings of Air Radio Navigation and Communication*, Brian Kendal, FRIN
- [12] *Transmission Characteristics of Inclined Wire Gratings* O. J. SISOW
- [13] *Wireless Direction Finding*, 3rd and 4th Editions R Keen
- [14] *Manual of Avionics* Brian Kendal, 1979
- [15] Review of the instrument landing system, Mutaz Mohammed Abdalla Eltahier, Prof. Khalid Hamid, Department of Communication, College of engineering, El-neelain University, Sudan.

-
- [16] ["Transportation Statistics Annual Report"](#) (PDF). Bureau of Transportation Statistics, U.S. Department of Transportation. November 2005. Retrieved February 18, 2007.
- [17] ELEC4504 Avionics Systems Chapter 6
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_landing_system#cite_note-2 [online]. Último acceso Enero 2018
- [19] Aircraft communications and navigation systems. Mike Tooley y David Wyatt
- [20] *Introducción al Sistema de Navegación Aérea*. Luís Pérez Sanz, Rosa María Arnaldo Valdés, Francisco Javier Sáez Nieto, Jorge Blanco Monge, Victor Fernando Gómez Comendador
- [21] <https://www.gps.gov/systems/gps/space/> [online]. Último acceso Enero 2018
- [22] Myron Kayton; Walter R. Fried. *Avionics Navigation Systems, 2nd Edition* capítulo 5.
- [23] *Introduction to air navigation, a technical and operational approach* Javier Lloret.
- [24] 2001 Federal radionavigation systems. <http://www.navcen.uscg.gov/pdf/frp/frp2001/FRS2001.pdf>. [Online]. Último acceso enero 2018
- [25] <http://www.hispaviacion.es/sistema-instrumental-de-aterrizaje-el-ils/> [online] Último acceso enero 2018.
- [26] <http://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/Convenio-de-Aviacion-Civil-Internacional-de-Chicago.pdf>. [Online]. Último acceso Enero 2018
- [27] https://www.icao.int/about-icao/Pages/ES/default_ES.aspx [online]. Último acceso Enero 2018.
- [28] <http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/Paginas/CNAF.aspx> [Online]. Último acceso enero 2018
- [29] http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/espectro/CNAF/tablas_2017.pdf [Online]. Último acceso enero 2018

-
- [30] http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf[Online]. Último acceso enero 2018
- [31] <http://www.elperiodico.com/es/sociedad/20120119/el-avion-es-el-unico-transporte-mas-seguro-que-el-barco-en-europa-1336660>. [Online]. Último acceso enero 2018
- [32] Instrument Landing System operational Notes, Civil aviation Safety Authority Australia
- [33] [https://www.skybrary.aero/index.php/Decision_Altitude/Height_\(DA/DH\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Decision_Altitude/Height_(DA/DH)) [Online]. Último acceso enero 2018
- [34] McGraw-Hill *Dictionary of Scientific and Technical Terms* 6th Edition
- [35] *Evaluation of instrument landings system DDM calibrating accuracies*, Dennis M.McCollum, Department of the Air Force Air University (ATC)
- [36] https://en.wikipedia.org/wiki/Instrument_landing_system. [Online]. Último acceso Febrero 2018
- [37] *Instalaciones de radiocomunicaciones*, pág. 44. , Javier García Rodrigo y Gregorio Morales Santiago.
- [3 8] https://ext.eurocontrol.int/lexicon/index.php/Instrument_Landing_System_Critical_Area. [Online]. Último acceso Febrero 2018
- [39] *VOR Navigation Receiver Repair Technology Research*, Jiang Yang, Fei Li, Civil Aviation Flight University of China
- [40] Operational Notes on Distance Measuring Equipment Contents, Civil aviation safety authority Australia
- [41] http://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/_Segmentos/_Empresas_y_profesionales/Empresas/Impuesto_sobre_Sociedades/Periodos_impositivos_a_partir_de_1_1_2015/Base_imponible/Amortizacion/Tabla_de_coeficientes_de_amortizacion_lineal_.shtml [online]. Último acceso Febrero 2018.
- [42] http://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/_Segmentos/_Empresas_y_profesionales/Empresas/Impuesto_sobre_Sociedades/Periodos_impositivos_a_partir_de_1_1_2015/Base_imponible/Amortizacion/Tabla_de_coeficientes_de_amortizacion_lineal_.shtml [online]. Último acceso Febrero 2018.
-

-
- [43] <https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html>. [online] Último acceso Febrero 2018
- [44] <http://www.expansion.com/diccionario-economico/coeficiente-de-amortizacion.html> [online]. Último acceso Febrero 2018.
- [45] [http://www.zhuartcc.org/wiki/Instrument_landing_system_\(ILS\)](http://www.zhuartcc.org/wiki/Instrument_landing_system_(ILS)) (Figura editada)
- [46] <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2016-10-18-02.aspx>. [online] Último acceso Febrero 2018.
- [47] https://www.smecc.org/mhlon_loomis.htm
- [48] https://es.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Flight_Simulator_X [online] Último acceso Febrero 2018.
- [49] <http://www.x-plane.com/> [online] Último acceso Febrero 2018.
- [50] <https://www.gps.gov/spanish.php>

Anexo I - Manual de usuario

El presente apartado explica detalladamente los pasos a seguir para ejecutar una simulación completa.

Para lanzar la aplicación bastará con abrir el entorno de desarrollo Matlab y ejecutar el script llamado “Ejecutar.m”. Lo primero que se mostrará es una pantalla donde debemos decidir si queremos simular la acción del viento o no.

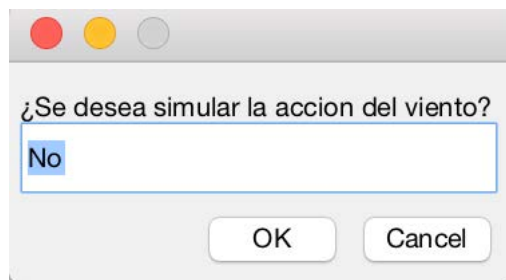


Figura 48: Pantalla de selección del viento

Las opciones que se pueden elegir son dos; “Si” o “No”, siendo muy importante que la primera letra sea en mayúscula ya que si no se reconoce la instrucción.

Posteriormente, se nos mostrará un menú para indicar las configuraciones iniciales de la simulación. Debemos elegir 3 puntos para situar el avión, eje X, eje Y y eje Z, dentro de los límites marcados por las líneas rojas. También se deberá indicar una velocidad de vuelo para el avión, habiéndose configurado 3 opciones diferentes: “Baja”, “Normal” y “Alta”. En caso de querer realizar la simulación con la velocidad normal de descenso se tendrá que introducir la palabra “Norm”, ya que por motivos de código no se reconoce la palabra “Normal”. Además, todas ellas tendrán que empezar por mayúscula. Finalmente, si no se ha decidido implementar el efecto del viento (figura 49), la simulación puede empezar. En el caso de querer simular viento (figura 50), se muestran cuatro opciones diferentes, pudiendo elegir; 1, para una dirección ascendente, 2 descendente y 3 y 4 para una dirección del viento a la derecha e izquierda respectivamente.

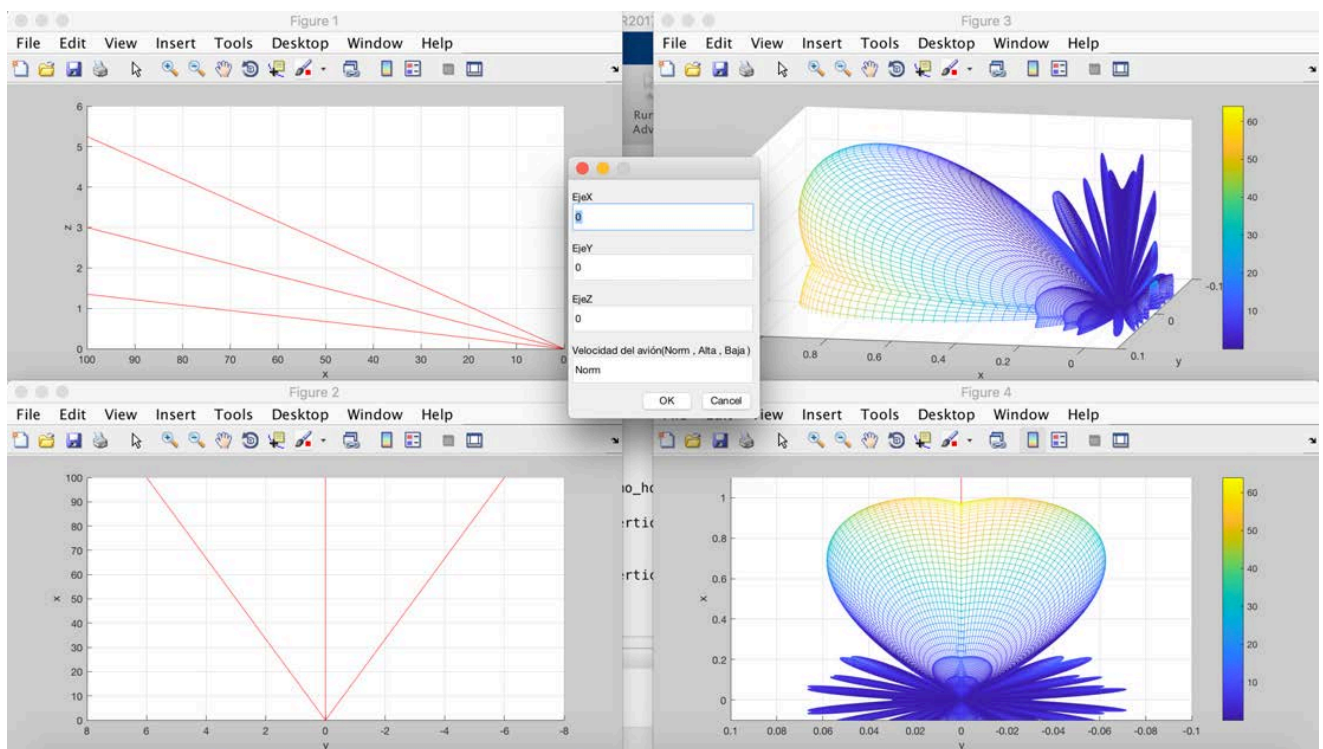


Figura 49: Pantalla de inicio sin simulación de viento

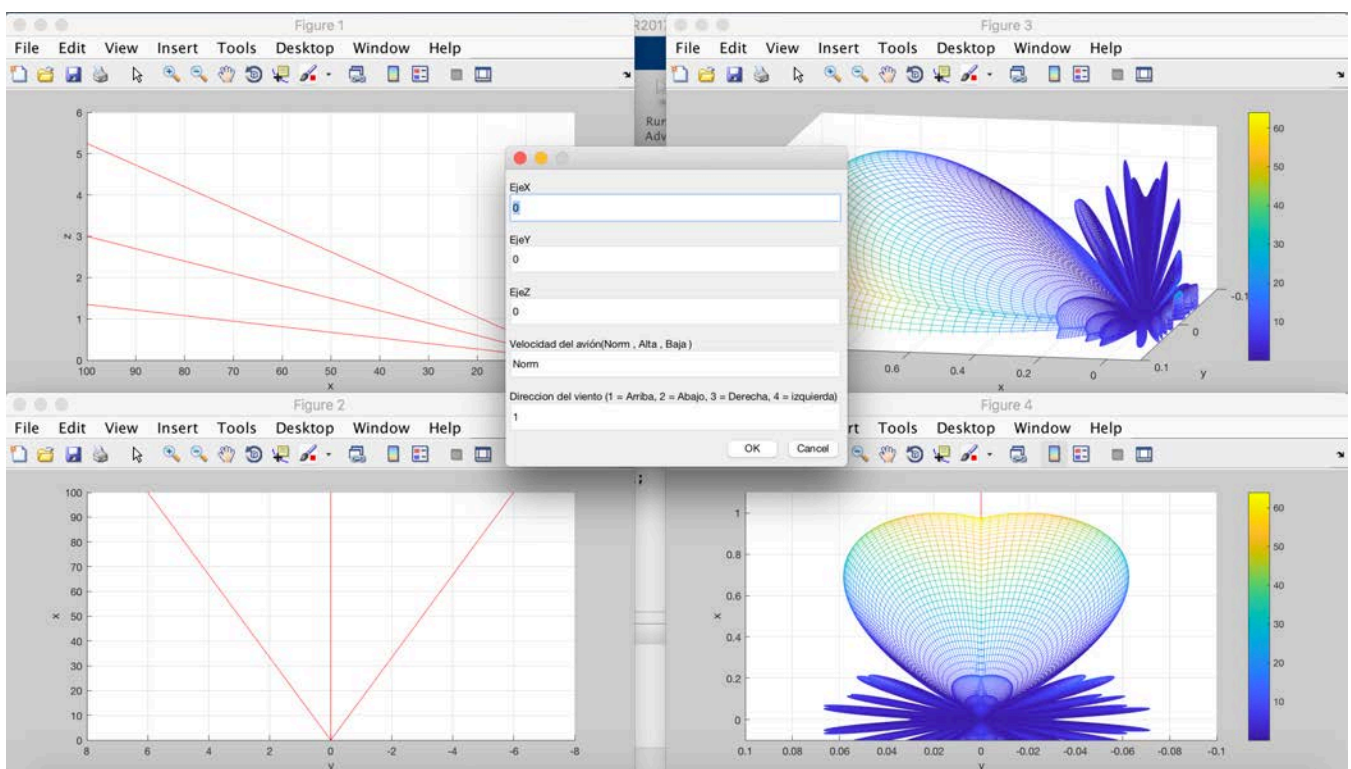


Figura 50: Pantalla de inicio con simulación de viento

Una vez hayamos elegido la configuración inicial, presionaremos el botón ok y dará comienzo la simulación.

A medida que se desarrolla el programa, podremos observar cómo el avión cambia de dirección, decidiendo en cada punto cual es la mejor opción para tomar en su siguiente movimiento. Aparecerá también la ayuda al aterrizaje mostrada en la cabina y podremos ir escuchando los pitidos de señalización que emiten las balizas cuando el avión las sobrevuela.

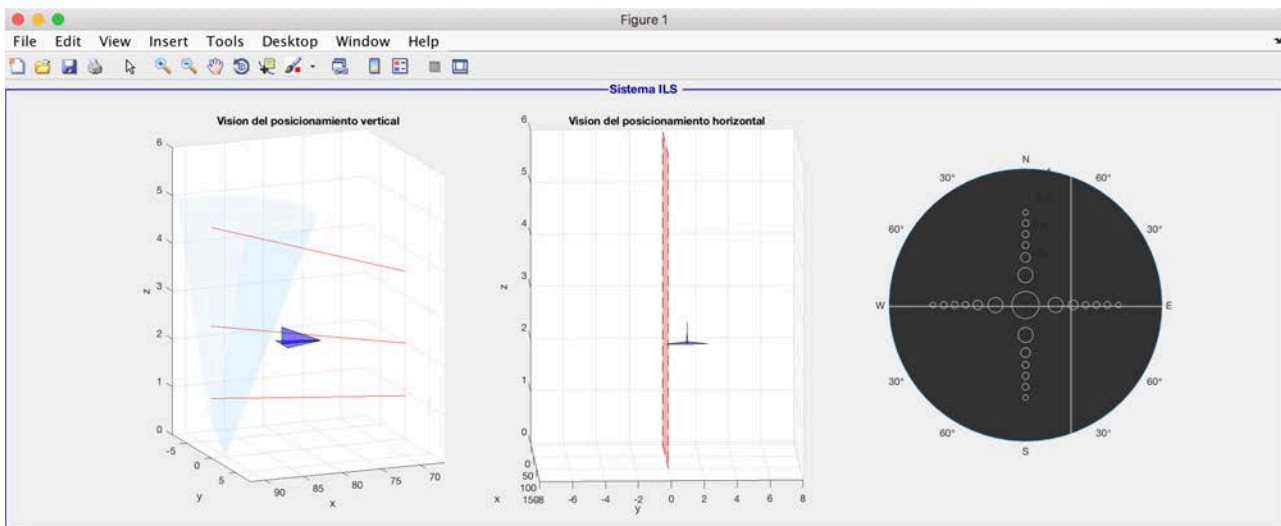


Figura 51: Pantalla de simulación

En el caso de una simulación correcta desarrollándose todo de la forma esperada y no habiendo seleccionado el efecto del viento, que alteraría el desarrollo correcto de la simulación, el estado final debe de ser similar al de la figura 52.

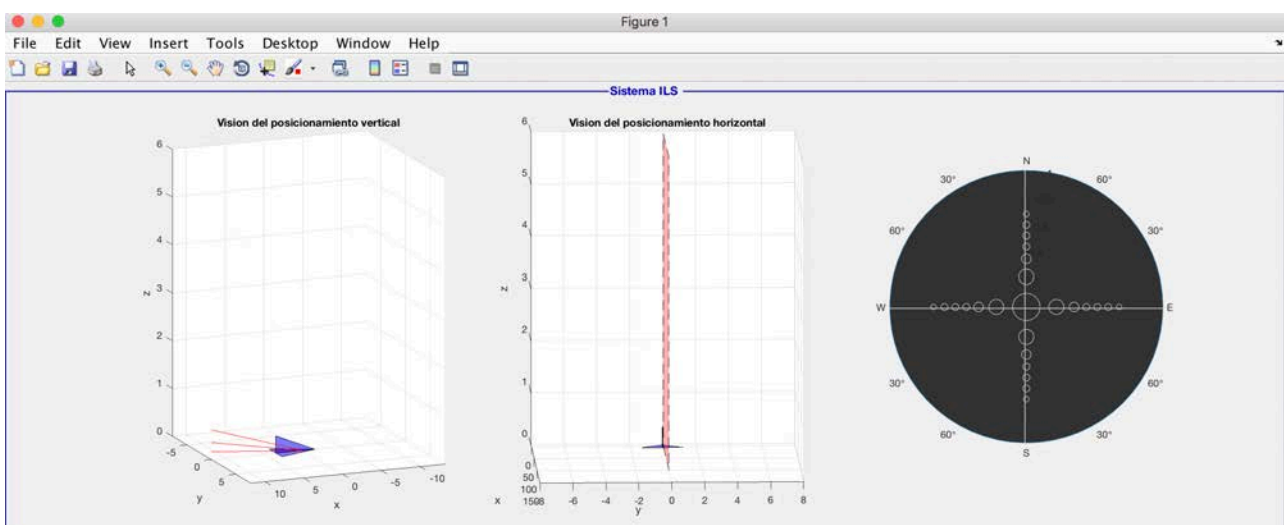


Figura 52: Estado final de una simulación correcta

Finalmente, se nos mostrará una pantalla donde podremos observar los detalles del recorrido trazado por el avión durante la simulación.

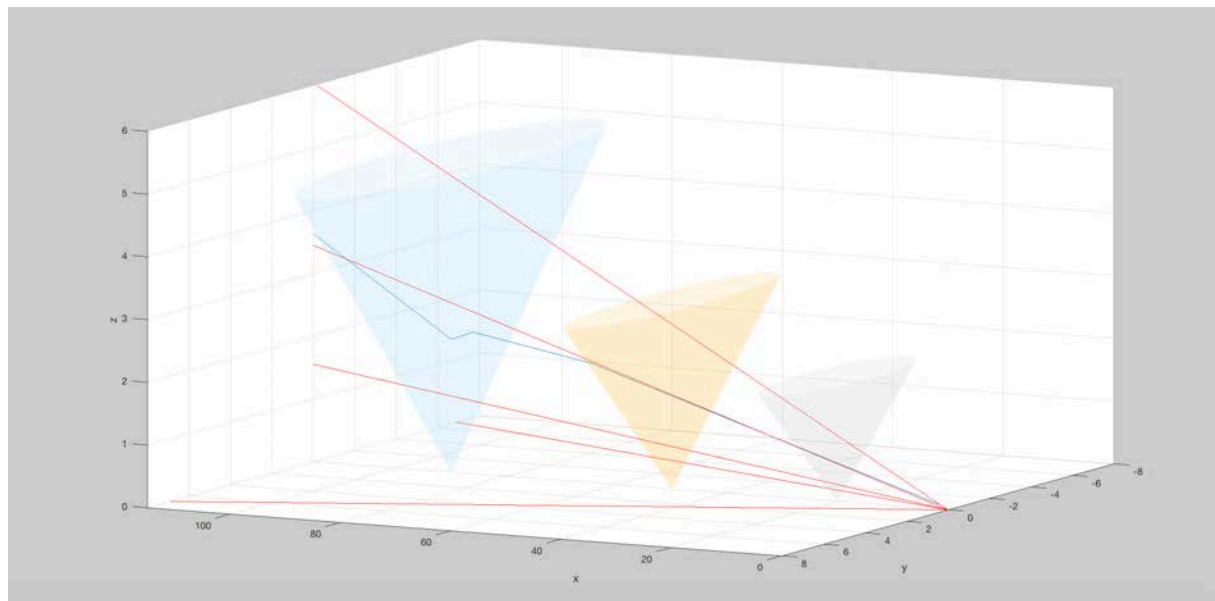


Figura 53: Pantalla final de la simulación

Anexo II - Extended Abstract

It is important, before any explanation about the technical and theoretical aspects of this project, to understand how crucial air transportation is and is going to be. For that reason we are going to attend to a study conducted by IATA (International air transport association).

This study shows how the passenger demand is going to grow over this next 20 years [46].

Top Ten Passenger Markets

Million O-D passenger journeys (to, from and within)

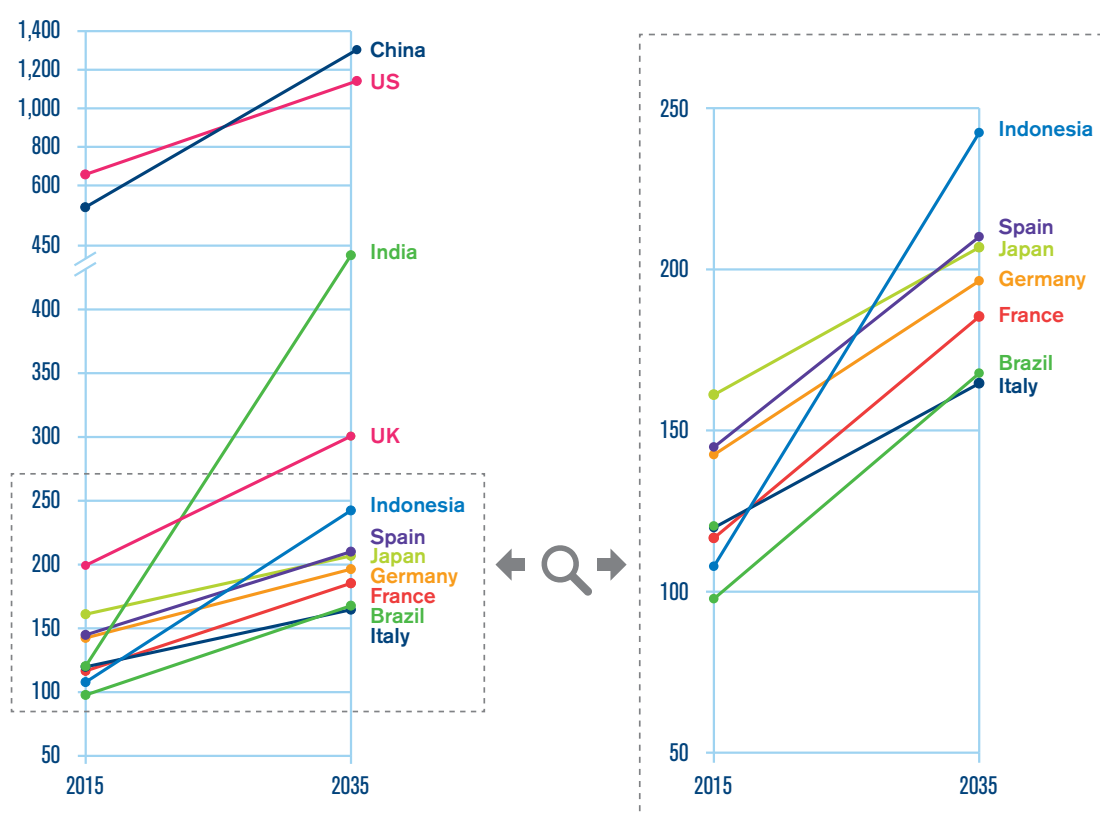


Figure 54: IATA forecast passenger demand

As we can see in the figure 54, for the top ten passenger markets, the number of passengers using air transportation it is expected to grow enormously. If we focus in the country of Spain we are going to go from around 150 million of passengers in 2015 to more than 200 million in 2035. But the most impressive grow is made by India which is going to become the third country in the world with the most air passengers.

We can also infer from the graphic that, countries with more air traffic are also countries with solid economies. This is why we can confirm that air traffic can be a

good indicator of the economical situation of a country. States should have to develop systems and controls to make this mean of transport more accesible to more people every day.

We have to ensure that air traffic is as safe and comfortable as possible and that is why systems, as the one developed in this thesis, have been created.

Because safety is one of the most important elements to take in consideration when analyzing air traffic, it is very useful to attend to a study from BOEING²³ determining how air accidents have gradually decreased in the last 50 years [30].

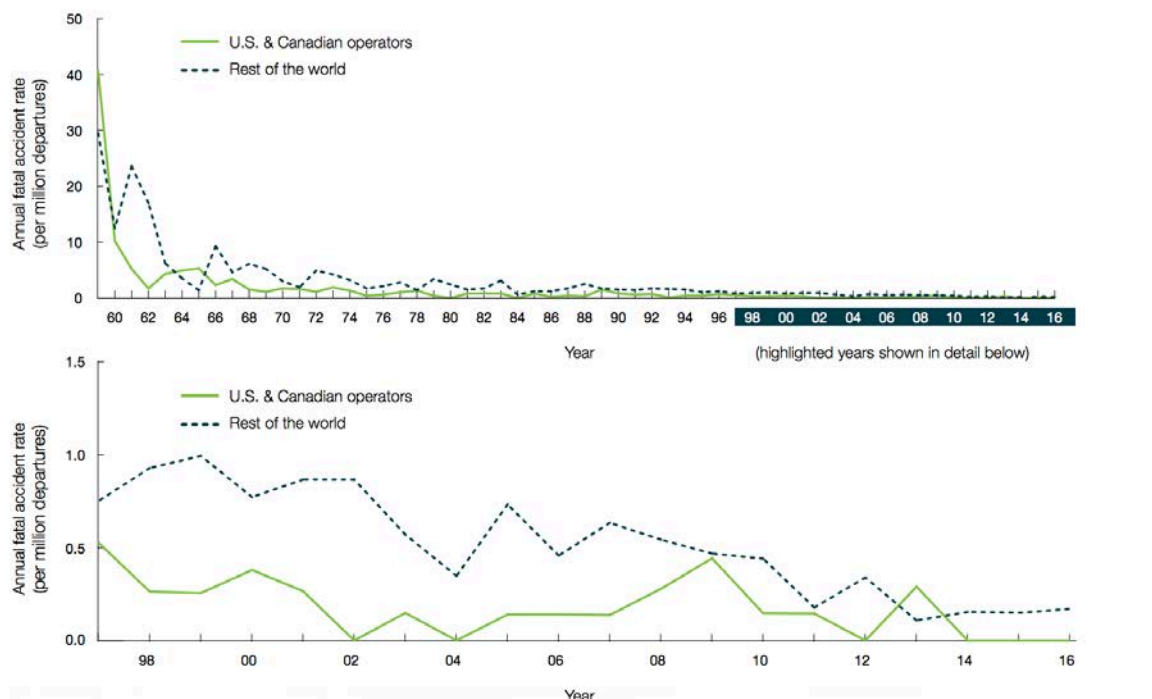


Figure 55: Boeing annual accidents study

This decrease is due to the development of systems and controls that minimize the risk of certain situations.

Visibility and adverse weather are 2 key factor when flying and landing an airplane, for that reason, radio-navigation and landing aids are so important. There are several technologies implemented nowadays to help the pilot placing the plane at the correct altitud at the correct time. In this thesis we have mentioned systems as GNSS, WAAS and MPLS but, as I mentioned before, we have focused on ILS. All of them are used for the same purpose.

²³ <http://www.boeing.com/>.

An instrument landing system is formed by three elements; the localizer antenna, the glide slope antenna and the marker beacons.

The localizer is the element that provides horizontal steering. From the point of view of the frequencies used, there are assigned 40 channels separated 50 KHz in the band of 108,10 to 111,95 MHz. The antennas used are a lineal arrays of 26 elements located at the end of the runway.

The coverage of the localizer is as the one shown in the figure 56 however it can vary depending on the topography of the terrain.

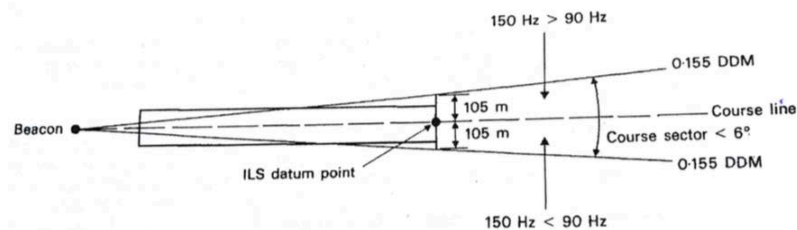


Figure 56: Horizontal coverage of the ILS

The carrier signal is modulated in AM to 90 Hz and 150 Hz. If the airplane is located to the left of the runway it would be flying a place where the signal modulated by 150 Hz predominates but, if the airplane is flying to the right of the runway it would be flying the 90 Hz zone. The deviation is given in DDM²⁴, difference in depth modulation.

The correct horizontal route would be the one that, in its trajectory, the airplane receives a DDM equal to zero. That would mean that it is receiving the same power from the signal modulated by 90 Hz and from the one modulated by 150 Hz. So, if the plane is receiving more power from the signal to 90 Hz that would be shown in the cockpit, and the pilot will know that he has to turn left. The same happens when he is flying left to the correct descending path, the receiver would receive more power from the signal modulated by 150 Hz so he would have to turn right.

The glide slope is the antenna in charge of providing the correct vertical descent path. The band of frequencies chosen is from 328,6 MHz to the 335,4 MHz. There are 40 possible frequencies to choose, all of them paired with one frequency of the localizer. So that the pilot in the cockpit just has to select a frequency for the localizer that the frequency of the glide slope will be automatically selected.

²⁴ It is the difference between the signal of more power and the signal with less power divided by 100

The way of providing the vertical steering it is similar to the horizontal. There are 2 different signals modulated by 90 Hz and 150 Hz. The one at 90 Hz will be situated over the correct vertical descending path, and the other will be under it, as it is shown in the figure 56.

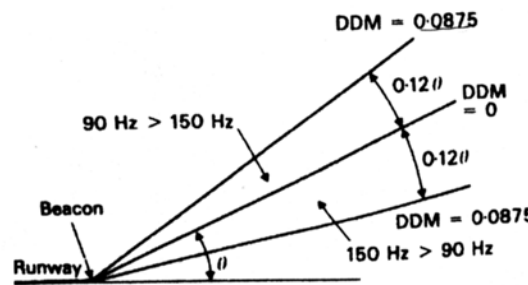


Figure 57: Vertical coverage of the ILS

So, when the airplane receives the power from the 2 different signals, it will calculate the DDM and it will decide whether it has to fly up or down.

Finally we have the marker beacons that are the ones that transmit the distance from the airplane to the runway. They are located through the final approach zone and they radiate signals at 75 MHz. When this signals are received in the airplane they produce hearing signals at different frequencies so the pilot, just by hearing them, will know how much is left to the runway. There are three of them; the outer marker, located between 4 and 7 nautical miles from the runway, the inner marker, at 3500 feet and finally the inner one situated from 75 to 450 meters from the runway.

To process the information given by these three elements a receiver equipment is needed in the plane. It is composed by three receiver antennas; one of them being the one tuned to the localizer, the other one to the glide slope and the last one to the marker beacons. The block diagram for the receiver antennas is like the one shown in the figure 57.

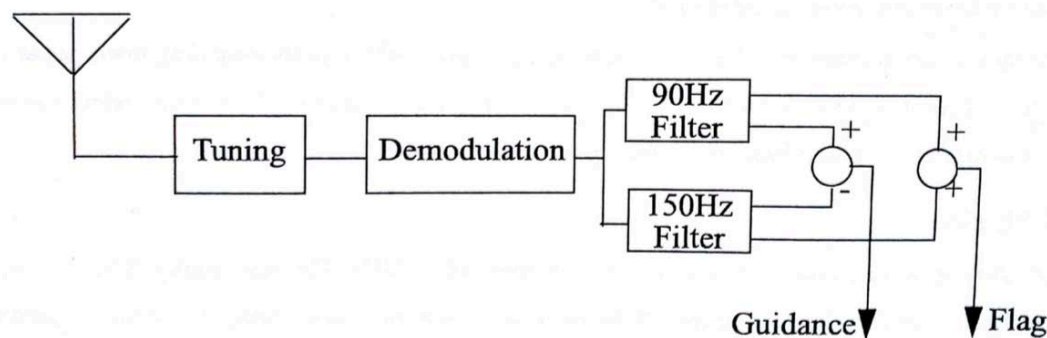


Figure 58: Block diagram for the receiving antennas

All of the elements previously mentioned have been simulated but also, in order to get a more accuracy environment, wind and airplane speed have also been simulated.

The interface is presented as follows: first we have to go to Matlab and execute the command “Ejecutar.m” and the simulation will start showing a menu where we have to indicate if we want to simulate the action of the wind.

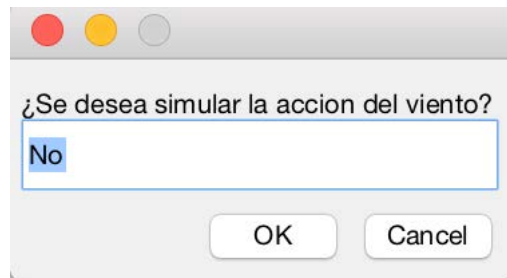


Figure 59: Initial display

After this first interaction, we should decide the inicial parameters for the plane. We can decide; the position, with 3 different points in the space, the speed of the plane, with three different settings; normal speed, high speed and low speed and finally, the wind speed where we will have to indicate the direction where it should move. This can be chosen in a menu like like the one shown figure 59.

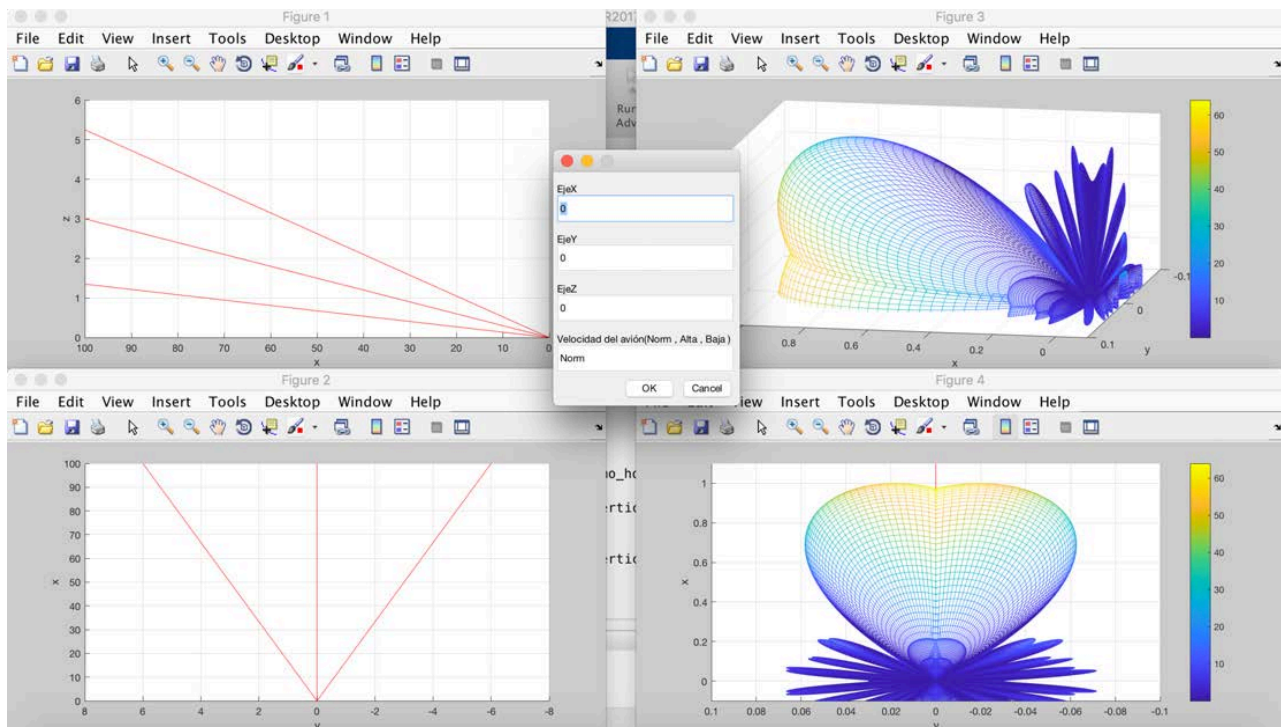


Figure 60: Initial configuration display

Once we have chosen the initial parameters, simulation can be started pressing the “Ok” button. A screen like the one in the figure 60 will appear.

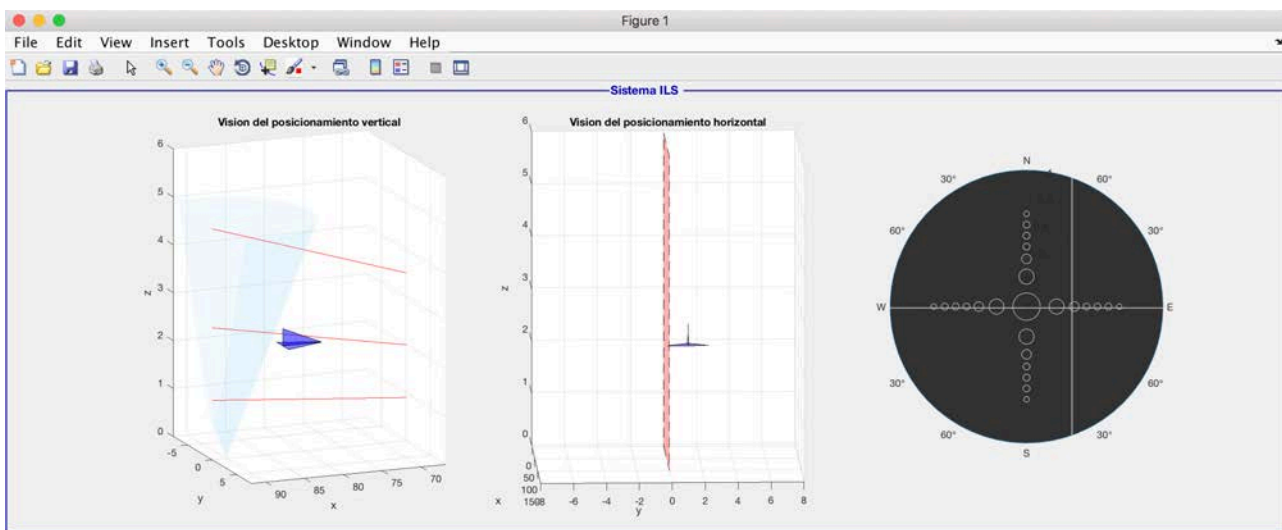


Figure 61: Simulation screen

We will be able to see how the plane fix its position and the way the marker beacons warn the pilot while the plane is flying through them. If the action of the wind has been simulated the final position will not be where it should, and there will be a deviation in the direction indicated.

When the flight is ended, the final screen of the simulation will be shown, this is the one in the figure 61. It will help us to review the way the plane has performed so we can study where it changed its direction or its speed.

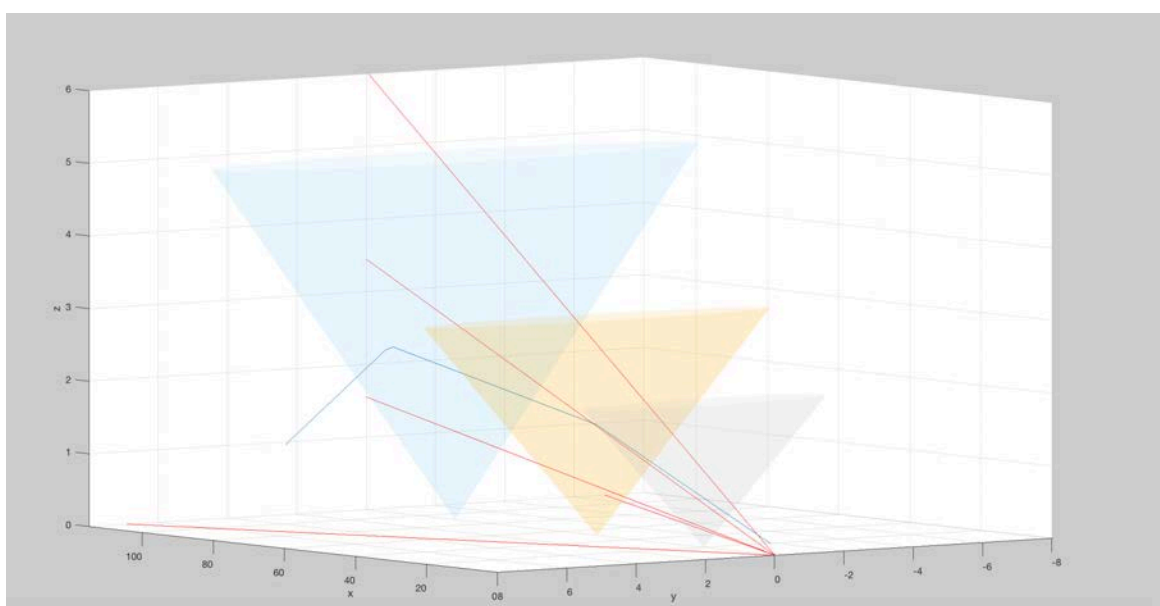


Figure 62: Final simulation screen

To verify the correct behavior of the simulation, 4 different situations have been checked, trying to cover all the possibilities. The situations mentioned are; placing the plane over the correct route and to the right, over it and to the left, under and to the right and finally under it and to the left.

For each case, to give an ok to the simulation, the plane has to correctly fix its position and land at the point (0,0,0). Also, if it is flying at a different speed than the normal one, it should change its speed in order to land the way it should.

In general terms, for the 4 situations previously mentioned, the airplane has behave optimally. For the cases where the airplane was place under the correct landing trajectory, the plane suffers a small deviation at the end of the flight. Apart from that, all the cases of study executed have passed the tests that these have to overcome to give them the status of “correct landing”. So, we can conclude that the plane behave correctly for all the situations.

For the conclusion of this Thesis, I have estimated more or less 168 days with 4 hours each of work, what gives a total of 672 hours divided in 4 blocks:

1. Theoretical approach.
2. System development.
3. Testing the simulation.
4. Writing the thesis.

This altogether, if we look for the economical aspect of the development of this research, it has been calculated a total budget of 46.180,32 €. I get this number after consider a price of 40 € per hour of student work and 80 € per hour of professor work and also the laptop and Matlab license used.

At this point, what is left is mention the future possible lines of research. The current development of this research can be the starting point for a simulator that will be able to recreate a real landing simulation. To achieve that, what is needed is more accuracy on the initial parameters. An improvement in the wind conditions, would allow us to recreate any meteorological phenomenon. And finally, if we were able to set up the exact speed of the plane at any time, we will be able to see how the airplanes react to different flight circumstances.